



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO FINAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS
ALERONES EN LOS PARÁMETROS
MECÁNICOS DE UNA MOTOCICLETA DE
COMPETICIÓN EN FRENADA

AUTOR: ALEJANDRO BERROCAL SIGUERO

TUTOR: HIGINIO RUBIO ALONSO

CO-TUTOR: WILFRIED COENEN

LEGANÉS SEPTIEMBRE 2013





Título:

Autor: Alejandro Berrocal Siguero

Director: Higinio Rubio Alonso

Co-tutor: Wilfried Coenen

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de
_____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la
Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





Agradecimientos

Quiero agradecer este trabajo, primero a mis padres, agradecerles que siempre me ayuden día tras día y hagan un esfuerzo grande para que siga estudiando en estos tiempos difíciles.

A mis amigos, siempre han estado ahí para ayudarme y me han acompañado en estos largos años de carrera, de duros exámenes y días interminables de prácticas y trabajos en la universidad.

A mi novia, que sin su gran ayuda y apoyo, no solo en este trabajo, sino en todas las facetas de la vida, no hubiese conseguido nunca acabar este trabajo, y en gran medida, este proyecto se lo debo a ella.

En general, a todas aquellas personas que me han ayudado a lo largo de todos estos años.



RESUMEN

El objetivo de este proyecto de ingeniería es el estudio de la incorporación de un alerón de geometría variable para ayudar al frenado de una motocicleta de un concurso de estudiantes (MotoStudent) similar a una motocicleta de Moto3 del Mundial de Motociclismo.

Después de una ligera introducción en la que se explican los conceptos de frenado aerodinámico, y su aplicación a otros vehículos de competición y aviones, hacemos una breve explicación de la competencia MotoStudent.

En relación con el tema central del proyecto, el diseño y el análisis de un alerón de geometría variable, que comenzará con una revisión de la evolución aerodinámica de motocicletas de competición a lo largo de la historia, desde sus inicios hasta nuestros días. Luego continuaremos con una exposición de los conceptos teóricos necesarios para realizar los diseños y su análisis con el fin de elegir el alerón óptima para nuestro propósito.



ABSTRACT

The objective of this engineering project is to study the incorporation of a variable geometry aileron to assist in braking to a motorcycle of a student competition (MotoStudent) similar to a motorcycle Moto3 of motorcycling world championship.

After a slight introduction which we explain the concepts of aerodynamic braking, and its application to other competition vehicles and aircraft, we make a brief explanation of MotoStudent competition.

With regard to the central theme of the project, the design and analysis of a variable geometry spoiler, we will start with a review of the aerodynamic evolution of competition motorcycles throughout history, from its beginnings to present days. Then we will continue with an exposition of theoretical concepts needed to carry out the designs and its analysis in order to choose the spoiler optimal for our purpose.

In the design phase, we will explain how to perform the ailerons using a CAD program; In this project we will use Pro/Engineer. Continuing with an explanation of the steps to follow and how to use the parameters needed to achieve the simulations.

Once this study was finished and we were chosen a solution, we will carry out a financial study and its budget, to evaluate the viability of this project for the implementation of this solution in the motorcycle that will participate in the Motostudent competition.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO	20
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	21
1.4. METODOLOGÍA	22
CAPÍTULO 2. MOTOSTUDENT, LA COMPETICIÓN	24
2.1 MOTOSTUDENT	24
2.1.1 La competición	24
2.2 NORMATIVA	27
2.3 CIRCUITO	32
2.3.1 Ubicación	34
2.3.2 Información técnica	34
2.3.3 Datos del circuito	35
2.3.4 Homologaciones	36
CAPÍTULO 3. AERODINÁMICA	37
3.1 INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA	37
3.2 CONCEPTOS DE LA AERODINÁMICA	38
3.3 HISTORIA DE LA AERODINÁMICA EN LA COMPETICIÓN MOTOCICLISTICA	40
3.3.1 Los orígenes de la aerodinámica en la motocicleta	41
3.4 AERODINÁMICA EN AVIACIÓN	56
3.5 EL PERFIL ALAR. PERFILES NACA	57
CAPÍTULO 4. CAD	60
4.1 DISEÑO CAD	60
4.2 CREACIÓN DEL MODELO CAD EN 3D DE GUARDABARROS Y ALERONES.	62
4.2.1 Guardabarros	62
4.2.2 Alerones	63



CAPÍTULO 5. CAM, ANSYS FLUENT	67
5.1 SIMULACIÓN DE FLUIDOS ALREDEDOR DE CUERPOS MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONAL	67
5.2 FLUENT	67
5.3 PROCESO DE SIMULACIÓN	69
5.3.1 Compresibilidad del flujo	71
5.3.2 Cálculo de los datos particulares para nuestro caso	75
5.3.3 Viscosidad del flujo	76
5.3.4 Ecuaciones de la capa límite bidimensional compresible y estacionaria	82
5.3.5 Desprendimiento de la capa límite	84
5.3.6 Estacionariedad del flujo	83
5.4 SIMULACIÓN ANSYS FLUENT	85
5.4.1 Ansys Fluent, la simulación	86
CAPÍTULO 6. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	108
6.1 INTRODUCCIÓN	109
6.2 ALERONES DE GEOMETRÍA VARIABLE	109
6.2.1 Alerones con geometría variable de tipo Fowler	109
6.2.1.1 Frenos aerodinámicos de las aeronaves	109
6.2.1.2 Terminología de perfiles aerodinámicos	113
6.2.2 Coeficiente de sustentación y resistencia	115
6.2.3 RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO 1	116
6.2.3.1 Valores de los perfiles	116
6.2.3.2 Cálculo del número de Reynolds	117
6.2.3.3 Resultado del modelo simulado 1	118
6.2.4 RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO 2	120
6.2.4.1 Valores de los perfiles	121
6.2.4.2 Cálculo del número de Reynol	123
6.2.4.3 Resultado del modelo simulado 2	123
6.2.5 RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO 3	132
6.2.6 RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO 4	145
6.2.6.1 Valores de los perfiles	145
6.2.6.2 Cálculo del número de Reynolds	147
6.2.6.3 Resultado del modelo simulado 4	147



6.3 ALERONES FIJOS	154
6.3.1 Valores perfiles	154
6.3.2 Cálculo del número Reynols	156
6.3.3 Resultados	157
CAPÍTULO 7. DISCURSIÓN DE LOS RESULTADOS	163
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	167
CAPÍTULO 9. TRABAJO FUTURO	168
CAPÍTULO 10. PRESUPUESTO	169
CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA	173



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Tráfico de motocicletas en Vietnam _____	16
Ilustración 2: Carrera de MotoGP en la primera prueba mundialista del 2013 ____	17
Ilustración 3: Accidente en una carrera Nascar _____	18
Ilustración 4: Frenos aerodinámicos de un avión _____	19
Ilustración 5: Logotipo de Motoestudent _____	24
Ilustración 6: Participantes de Motostudent de la primera edición _____	24
Ilustración 7: Carrera de la competición de Motostudent _____	25
Ilustración 8: Logotipo de la segunda edición de la competición de Motostudent _____	26
Ilustración 9: Clausura de la primera edición de la competición de Motostudent _____	26
Ilustración 10: Representación gráfica de la norma B.2.1.1 _____	28
Ilustración 11: Representación gráfica de la norma B.2.1.2 _____	28
Ilustración 12: Representación gráfica de la norma B.2.1.3 _____	29
Ilustración 13: Representación gráfica de la norma B.2.1.4 _____	29
Ilustración 14: Representación gráfica de la norma B.2.1.5 _____	30
Ilustración 15: Representación gráfica de la norma B.2.1.7 _____	30
Ilustración 16: Representación gráfica de la norma B.2.1.8 _____	31
Ilustración 17: Representación gráfica de la norma B.2.1.9 _____	31
Ilustración 18: Circuito de velocidad Motorland _____	32
Ilustración 19: Plano de las diferentes configuraciones posibles del circuito de Motorland _____	33
Ilustración 20: Posibles trazados del circuito de Motorland _____	34
Ilustración 21: Primera motocicleta con motor a vapor _____	40
Ilustración 22: Motocicleta con cuadro y cuatro ruedas de madera _____	41
Ilustración 23: Motocicleta NSU 1901 _____	42
Ilustración 24: Motocicleta Adler de 1902 _____	42
Ilustración 25: Indian single 1904 _____	42
Ilustración 26: Motocicleta Harley-Davidson 1907 _____	42
Ilustración 27: Greyhound 1909 _____	42
Ilustración 28: The Flying Merkel Model V 1911 _____	42
Ilustración 29: New Era de 1912 _____	43
Ilustración 30: Indian V-Twin de 1914 _____	43
Ilustración 31: Sidecar Harley Davidson Model 11J de 1915 _____	43
Ilustración 32: Inmme R100 de 1948 _____	44
Ilustración 33: Harley Davidson FL HydraGlide 1949 _____	44
Ilustración 34: AJS E95 500 Racer 1953 _____	45

Ilustración 35: NSU “Flying Hammock” de 125cc a través del lago salado de Utah a 240 km/h, una de las motos más aerodinámica que se han construido	45
Ilustración 36: Mondial Gp 125cc	46
Ilustración 38: NSU Sportmax	48
Ilustración 37: NSU	48
Ilustración 39: Gilera	48
Ilustración 40: MV mencionada anteriormente	49
Ilustración 41: Norton 500 anteriormente mencionada	50
Ilustración 42: Moto Guzzi V8 anteriormente mencionada	52
Ilustración 43: Honda 250cc de 1961	53
Ilustración 44: Moto 3 2012 Equipo Blu sens Pacha de Maverick Viñales	53
Ilustración 45: Desmosidici motoGP 2011 donde se pueden observar los alerones	55
Ilustración 46: Karl Abraham, Ducati GP 11 campeonato MotoGP del 2011 donde se aprecian los alerones	55
Ilustración 47: BMW R100 RS de 1980	56
Ilustración 48: Logotipo de PTC	61
Ilustración 49: Guardabarros realizado en Creo2	62
Ilustración 50: Motocicleta de Luis Salom	63
Ilustración 51: Guardabarros con alerones	64
Ilustración 52: Logotipo Creo Parametric 2.0	64
Ilustración 53: Esbozo del diseño	65
Ilustración 54: Extrusión	65
Ilustración 55: Plano paralelo al guardabarros	66
Ilustración 56: Logotipo de ANSYS	67
Ilustración 57: Simulación en FLUENT	69
Ilustración 58: Curvas numeradas del circuito de Aragón	70
Ilustración 59: Flujo subsónico	73
Ilustración 60: Cuerpos fuselados	78
Ilustración 61: Cuerpos romos	78
Ilustración 62: Elevados ángulos de ataque crean pronto desprendimientos de la capa límite	78
Ilustración 63: Gráfico de fuerzas de un fluido	79
Ilustración 64: Capa límite	80
Ilustración 65: Gráfico de la capa límite alrededor de un perfil	80
Ilustración 66: Desprendimiento de capa límite	84
Ilustración 67: Pantalla del programa ANSYS FLUENT	86
Ilustración 68: Menu de ANSYS FLUENT	86
Ilustración 69: Menu de unidades del SI	88
Ilustración 70: Pantalla menu Tools	88

Ilustración 71: Pantalla menu Tools Freeze	87
Ilustración 72: Pantalla menu Tools Enclosure	89
Ilustración 73: Menu Enclosure	90
Ilustración 74: Menu Booleand	95
Ilustración 75: Malla cuadrangular	92
Ilustración 76: Malla hexagonal	92
Ilustración 77: Malla triangular	93
Ilustración 78: Malla tetraédrica	93
Ilustración 79: Menu Mesh	96
Ilustración 80: Modelo mallado	97
Ilustración 81: Menu de Name Selection	97
Ilustración 82: Menu para hacer el mallado manual	98
Ilustración 83: Menu de Mapped Face Meshing	98
Ilustración 84: Mallado final sin ajustar	99
Ilustración 85: Menu Sizing	100
Ilustración 86: Edge Sizing	100
Ilustración 87: Mallado final	100
Ilustración 88: FLUENT Launcher	101
Ilustración 89: Parámetros FLUENT	102
Ilustración 90: Models FLUENT	103
Ilustración 91: Materials FLUENT	103
Ilustración 92: Velocidad Inlet	105
Ilustración 93: Solution Methods	106
Ilustración 94: Cambio manual	107
de los parámetros en FLUENT	107
Ilustración 95: Operación de frenos aeronáuticos	110
Ilustración 96: Frenos desplegados de tipo sencillo	110
Ilustración 97: Frenos aerodinámicos tipo Fowler	11
Ilustración 98: Freno tipo ranura	112
Ilustración 99: imagen de los frenos aerodinámicos partidos	112
Ilustración 100: Terminología de un perfil	113
Ilustración 101: Fuerzas aerodinámicas	114
Ilustración 102: Perfil del modelo 1	116
Ilustración 103: Alerón del primer modelo	117
Ilustración 104: Valores de fuerzas de arrastre aportados por el programa	118
Ilustración 105: Gráfico de presiones en el alerón	119
Ilustración 106: Gráfico de los vectores de velocidad sobre el alerón	120
Ilustración 107: Perfil del primer alerón del modelo 2	120
Ilustración 108: Perfil del segundo alerón del modelo 2	122

Ilustración 109: Alerones simulación 2	122
Ilustración 110: Gráfico de residuos del modelo 2	123
Ilustración 111:	123
Ilustración 112:	125
Ilustración 113: Gráfica de la evolución del drag en cada iteración	125
Ilustración 114: La misma gráfica anterior pero ampliada	127
Ilustración 115: Presiones sobre los alerones	128
Ilustración 116: Vectores de velocidad sobre los alerones	129
Ilustración 117: Vectores de velocidad ampliada	129
Ilustración 118: Detalle de turbulencias y cambios de líneas de corriente	130
Ilustración 119: Imagen detalle ampliada	130
Ilustración 120: Líneas de corriente vista en plano perpendicular a los alerones	131
Ilustración 121: Imagen ampliada de líneas de corriente	132
Ilustración 122: Alerones del modelo 2	133
Ilustración 123: Gráfica de residuos en cada iteración e iteración en la que converge	134
Ilustración 124: Valores de coeficientes obtenidos por el programa	134
Ilustración 125: Gráfica del programa del cálculo del CI en cada iteración	134
Ilustración 127: Gráfica del Cd para cada iteración	135
Ilustración 127: Gráfica del Cd para cada iteración	135
Ilustración 128: Gráfica Cd ampliada	135
Ilustración 129: Valor de la fuerza drag dada por el programa en newton	136
Ilustración 130: Valores fuerza lift aportados por el programa en newton	136
Ilustración 131: fuerzas de presión sobre los alerones	137
Ilustración 132: Vectores de velocidad	138
Ilustración 133: Ampliación de la imagen anterior	138
Ilustración 134: Efecto rebote del guardabarros	139
Ilustración 135: Imagen ampliada del salto sobre el borde de parte del fluido	140
Ilustración 136: Flujo de aire alrededor del rail	140
Ilustración 137: Plano perpendicular a los alerones donde se ven los vectores de velocidad	141
Ilustración 138: Plano detalle de vectores de velocidad	142
Ilustración 139: Mapa de presiones en los alerones por colores	142
Ilustración 140: plano detalle del borde de ataque del primer alerón	143
Ilustración 141: Gráfico de velocidades a lo largo de los alerones	143
Ilustración 142: Plano detalle de velocidades	144
Ilustración 143: Primer perfil del modelo 4	145
Ilustración 144: segundo perfil del modelo 4	146
Ilustración 145: Segundo perfil del modelo 4	145



Ilustración 146: Alerones modelo 4 _____	145
Ilustración 147: Escala de residuos _____	148
Ilustración 148: Valores c_d aportados por el programa _____	148
Ilustración 149: Valores de las fuerzas aportados por el programa _____	149
Ilustración 150: Fuerzas de sustentación aportadas por el programa _____	149
Ilustración 151: Valores de las presiones sobre los alerones _____	150
Ilustración 152: valores de los vectores de velocidad _____	151
Ilustración 153: Plano detalle del rebote del guardabarros _____	151
Ilustración 154: Plano detalle del flujo alrededor de la canaladura _____	152
Ilustración 155: Presiones en un plano perpendicular a los alerones _____	152
Ilustración 156: Velocidades en un plano paralelo a los alerones _____	153
Ilustración 157: vectores de velocidad en un plano perpendicular a los alerones _____	153
Ilustración 158: Perfil del primer alerón del modelo geometría fija _____	154
Ilustración 159: Perfil del segundo alerón del modelo de geometría fija _____	155
Ilustración 160: Alerones del modelo de geometría fija _____	156
Ilustración 161: Gráfica de los residuos e iteraciones _____	157
Ilustración 162: Valores de C_d ofrecidos por el programa _____	157
Ilustración 163: Valores de las fuerzas de arrastre dados por el programa _____	158
Ilustración 164: Valor de fuerza lift que se obtiene del programa _____	158
Ilustración 165: Imágenes de las presiones sobre los alerones _____	159
Ilustración 166: Gráfico de vectores de velocidad _____	159
Ilustración 167: Plano detalle de los vectores de velocidad _____	160
Ilustración 168: Plano perpendicular a los alerones gráfico de presiones _____	161
Ilustración 169: Plano perpendicular a los alerones gráfico de velocidades _____	161

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cada día que pasa, la motocicleta tiene más peso e importancia en la sociedad como medio de transporte. La motocicleta se está convirtiendo en un vehículo de muy útil para desplazarse por la ciudad y también en viajes largos. Dentro del marco nacional, poco a poco esta tendencia está aumentando ya que es un vehículo versátil y muy poco contaminante. Encontramos motocicletas la mayoría de ellas para uso como transporte son motocicletas de cuatro tiempos mono cilíndricas que reducen en gran medida las emisiones al medio ambiente, pero aún hay más, ya que se están empezando a vender motocicletas eléctricas y en ciudades, centros comerciales, etc. se están colocando puntos gratuitos para cargar las baterías promoviendo el uso de estos vehículos.

En el marco mundial, las motocicletas son un gran vehículo ya que es barato, útil y consume menos que un automóvil y en Asia y en Sudamérica pero aún más en el primero, la mayoría de la población posee motocicletas, dejando imágenes espectaculares (imagen 1) de los problemas de tráfico que existe y de la acumulación de estas en cruces y semáforos. Además en estos países existe un gran número de motocicletas eléctricas fabricadas en su mayoría de forma artesanal.



Ilustración 1: Tráfico de motocicletas en Vietnam

Con respecto a la competición, las motocicletas siempre han tenido un gran público, pero en la actualidad, el mundo de las dos ruedas está de gran moda en Europa y aún más a nivel nacional con los numerosos pilotos que hay en los diferentes campeonatos europeos e internacionales. Esta tendencia sigue en aumento con la última noticia de que el CEV (Campeonato de España de Velocidad) contará con varias pruebas fuera del país para promocionar este campeonato que se ha convertido en la cantera y principal escaparate para entrar en el campeonato estrella que es el Mundial de MotoGP. Donde compiten motos prototipo realizadas por los numerosos equipos que existen en las tres categorías existentes (Moto 3, Moto2 y Moto GP) y de las fábricas más importantes a nivel mundial.



Ilustración 2: Carrera de MotoGP en la primera prueba mundialista del 2013

En esta competición todos los equipos buscan desde la ingeniería y el diseño lograr los mejores resultados posibles, y ello engloba todas las partes de las motocicletas, desde neumáticos, suspensiones motores hasta aerodinámica, esta última principal objetivo de este proyecto, que de fuente de inspiración se tomará diseños y conceptos de otros sectores como la Fórmula 1, la Nascar o el funcionamiento del freno de aeronaves.

La Fórmula 1, en los últimos años, se ha centrado en la búsqueda de la máxima eficiencia aerodinámica, mediante alerones y formas geométricas, que consigan reducir la resistencia al aire, y ayudar a que los monoplazas estén lo más pegados al suelo posible.

La Nascar, competición Americana de velocidad, en las cuales los vehículos son diseñados para correr a la máxima velocidad posible, en un ovalo durante largas carreras, donde la aerodinámica es clave para conseguir altas velocidad y lograr grandes “rebufos” (efecto que se produce tras el paso de un vehículo que deja una zona de baja presión, y donde el aire, debe ocupar rápidamente el espacio de aire desalojado por el vehículo succionando el aire de que se encuentra rodeando el a este, provocando que el vehículo seguidamente detrás consiga mayores velocidades para poder ganar). Además esta competición, incorporó unos frenos aerodinámicos en la parte superior de los coches que se despliegan si el vehículo pierde el control para frenar más rápido en caso de pérdida de control o accidente, como se puede ver en la ilustración 3.



Ilustración 3: Accidente en una carrera Nascar

Los frenos aerodinámicos de los aviones, van instalados en las alas y se despliegan en la maniobra de aterrizaje y son unos alerones que ejercer resistencia al aire y reducen considerablemente la velocidad de este. En la siguiente ilustración se puede observar los frenos aerodinámicos anteriormente mencionados.



Ilustración 4: Frenos aerodinámicos de un avión

Bajo este contexto, este trabajo consistirá en el estudio aerodinámico mediante simulación mediante ordenador de la implementación de unos alerones con geometría variable en el guardabarros delantero de una motocicleta para ayudar en la frenada. El guardabarros se incorporará a una motocicleta de doscientos cincuenta centímetros cúbicos cuatro tiempos similares a una moto 3 del mundial de motociclismo que se diseñará y fabricará para la competición a nivel internacional de Motostudent. Esta competición de ingeniería se realizará por alumnos de diferentes universidades europeas en el diseño y fabricación de una moto con las características anteriores y que además realizará varias pruebas finalizando con una carrera. Esta competición se lleva a cabo en el circuito de Aragón de Motorland y la competición engloba desde el diseño hasta la fabricación en tres semestres.

Los alerones se diseñarán primero con un programa CAD, que en este caso será Pro/Engineer, y que después será simulado utilizando Ansys, más concretamente en un módulo de este programa denominado Fluid dynamics para obtener todos los datos y parámetros aerodinámicos para finalmente seleccionar un modelo lo más eficiente posible para su después fabricación e incorporación en la competición.



1.2 OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El objetivo de este trabajo final de grado es diseñar unos alerones así como determinar su comportamiento aerodinámico para favorecer en la frenada a una motocicleta similar a una Moto3 del mundial de MotoGP para implementarlos en el guardabarros delantero para participar en la competición de Motostudent. Todo ello se realizará en los plazos establecidos y dentro de un presupuesto estipulado por la organización Motostudent.

Para la consecución de este objetivo se desarrollaran las siguientes tareas:

1. Realizar un estudio previo y analizar los conceptos aerodinámicos y los perfiles alares que se utilizan en la actualidad y además se hará un estudio de la evolución a lo largo de la historia de la aerodinámica en competición de motocicletas. Con el fin de valorar sus diferentes funcionalidades, adaptándolo o sirviendo de inspiración para nuestro modelo en base a nuestras necesidades.
2. Buscar información y aprendizaje de los dos problemas que se van a utilizar en este trabajo de fin de grado, tanto el de diseño CAD (Pro/engineer) como el de análisis CAM (Ansys Workbench).
3. Realizar los diferentes diseños para su posterior simulación y análisis de los resultados.
4. Optimizar el mejor diseño, y seleccionarlo, argumentando los motivos de su elección.

Concretamente, en este trabajo de fin de grado, se reflejará el trabajo necesario para diseñar, simular y analizar los alerones que nos ofrezcan una mayor ayuda en la frenada, con la intención de mejorar los tiempos por vuelta de una motocicleta de competición.



1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

A continuación, se explicará concretamente cómo está estructurado el proyecto para una mejor comprensión del mismo.

1. **CAPÍTULO 1:** Breve introducción de lo que consiste el trabajo de fin de grado, motivación y ambiente en el cuál se desarrolla este.
2. **CAPÍTULO 2:** Expondrá en detalle lo que es la competición estudiantil de Motostudent.
3. **CAPÍTULO 3:** Se desarrollara todo el aspecto teórico y técnico aerodinámico que forman parte de las bases de desarrollo de los alerones. Además, este capítulo engloba, desde la evolución de la aerodinámica desde sus inicios, la evolución aerodinámica en las motocicletas.
4. **CAPÍTULO 4:** Engloba todo lo relacionado con el CAD, introducción, explicación del programa elegido, características del programa, y explicación de todo el proceso de diseño en 3D y 2D de los alerones para su después análisis.
5. **CAPÍTULO 5:** Expone los motivos por los que se elige el programa en cuestión. Una introducción del programa, explicación de todo el proceso elaborado para la obtención de los datos, además de la explicación de todos los valores teóricos para llevar a cabo la simulación.
6. **CAPÍTULO 6:** En este capítulo se exponen los resultados de la simulación realizada para los diferentes modelos diseñados.
7. **CAPÍTULO 7:** Se realiza una valoración de los resultados, un análisis de las mejoras obtenidas, una comparación de modelos y una exposición de los motivos por los que se selecciona un modelo en concreto.



- 8. **CAPITULO 8:** Se realiza una conclusión de los datos obtenidos.

- 9. **CAPITULO 9:** Se propone aspectos que no se han estudiado en este trabajo y que serían interesantes de abordar en un futuro. Se expone además una posible continuación de mejora de los diseños de este trabajo.

- 10. **CAPITULO 10:** Muestra el presupuesto del proyecto.

- 11. **CAPITULO 11:** Bibliografía, recoge libros, documentos y páginas web empleadas para la realización de este proyecto.

1.4. METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos que se pretender en este proyecto ideamos una metodología de estudio propia, ya que además del estudio aerodinámico de nuestros alerones, también se pretende implantar una disciplina de estudio con la intención de ser utilizado en la asociación UC3Moto para futuros diseños aerodinámicos en nuevas motocicletas.

Nuestro método de estudio tendrá varios pasos a seguir, que exponemos a continuación:

- 1) Documentación, recopilación de información y de herramientas (tanto para el diseño como para las posteriores simulaciones), este paso más que un primer paso, es un paso cero, ya que no se debe comenzar ningún diseño sin el proceso de documentación previo. También es necesario conocer las herramientas de las que disponemos con la intención de poder simular y obtener datos, lo más reales posible para nuestros diseños.

- 2) Objetivo a realizar, paso importante ya que es la base de todo lo que hagamos posteriormente en nuestro estudio. Este paso adquiere mayor importancia si el trabajo a realizar es en grupo, puesto que para que un trabajo en grupo sea efectivo ha de estar perfectamente estructurado y organizado entre todos sus miembros.

- 3) Prediseños y diseños, hacemos los diseños basándonos en lo estudiado con anterioridad, siendo fieles a los objetivos marcados



- 4) Simulación y cálculo de nuestros diseños, ponemos a prueba las prestaciones de nuestros diseños mediante unas simulaciones en las mismas condiciones.
- 5) Selección y optimización del diseño, de todos los diseños simulados escogemos el que mayores prestaciones nos ofrezca, según la finalidad deseada, y optimizamos el primer diseño.

CAPITULO 2. MOTOSTUDENT, LA COMPETICIÓN

2.1 MOTOSTUDENT



La primera edición de Motostudent se inició en el 2008, creada por MEF con la colaboración de DORNA.

La Fundación MEF, promueve desde hace 5 años la competición bienal MotoStudent, un reto universitario, no sólo formativo y educativo, sino también deportivo.

Ilustración 5: Logotipo de Motoestudent

El objetivo es una competición para estudiantes universitarios en la que deben trabajar en el diseño, desarrollo y construcción de un prototipo de motocicleta desde cero, basada en las del campeonato del mundo de Moto 3, a partir de un kit proporcionado por la organización.

En la primera edición, las motos eran de ciento veinticinco cc y dos tiempos, y en la segunda y tercera edición, se cambiaron por motos de doscientos cincuenta cc y cuatro tiempos.

Una vez construidas, se realizan diferentes pruebas evaluables para optar a los diferentes premios, y con ello, al prestigio correspondiente. Actualmente, ya se disputa la tercera edición de esta competición. En ella, se presentará la motocicleta en la que se desea incluir los alerones en los que se basa este proyecto.



Ilustración 6: Participantes de Motostudent de la primera edición

Aspectos como aceleración, frenada, manejabilidad y durabilidad, serán evaluados durante el evento en el circuito de MotorLand Aragón.

Otros factores que se serán considerados son la fabricación, aspectos económicos, ergonómicos, estéticos, mantenimiento, innovación en el diseño y fiabilidad.

Uno de los propósitos de esta competición es que el equipo universitario se considere integrado en una empresa fabricante de motos, para desarrollar y fabricar un prototipo bajo unos condicionantes técnicos y económicos.

2.1.1 La competición

Las pruebas se realizarán en el circuito de Motorland de Aragón, circuito oficial de DORNA, donde se disputa la prueba puntuable para el campeonato mundial de MotoGP. Dichas pruebas y la carrera se disputan en un circuito de menor recorrido con la posibilidad, este año, de celebrarse en el trazado mundialista.



Ilustración 7: Carrera de la competición de Motostudent

La competición consta de dos fases:

- En la fase MS1 los proyectos serán juzgados desde el punto de vista industrial como modelo de proyecto empresarial, valorando aspectos como coste, diseño, innovación, industrialización, diseño de ingeniería, presentación, etc.

También, las motos se probarán para determinar su seguridad y funcionamiento a través de varias comprobaciones estáticas y dinámicas incluyendo inspección técnica, test de frenado, varios ensayos de prestaciones, resistencia y comportamiento dinámico.

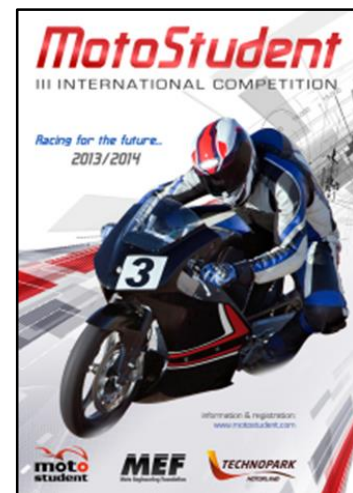


Ilustración 8: Logotipo de la segunda edición de la competición de Motostudent

Según los comportamientos de la moto, se puntuará al equipo con la correspondiente nota.

- La fase MS2 constará de una carrera final en el circuito elegido en el Motorland de Aragón.

El desafío es desarrollar una moto que cumpla con éxito todos los tests y pruebas de la competición de Motostudent.



Ilustración 9: Clausura de la primera edición de la competición de Motostudent



Está competición, aporta a los equipos la oportunidad de ponerse a prueba y demostrar sus aptitudes en ingeniería, creatividad y habilidades empresariales.

Los participantes que integren los equipos deberán adquirir el papel de una empresa de motos y tendrán que diseñar, fabricar y evaluar un prototipo de moto de competición destinado al público no profesional y a la competencia, todo ello en un fin de semana.

La competición en sí misma, es un reto para los estudiantes, ya que en un periodo de tiempo de tres semestres, han de demostrar y probar su capacidad de creación e innovación y la habilidad de aplicar directamente sus conocimientos como ingenieros, en comparación con los otros equipos de otras universidades.

Por ello, los equipos tendrán que exponer su producto al público general, como si de una firma del sector se tratara. El desafío, por tanto, no es únicamente un proyecto de ingeniería, sino la creación de un modelo empresarial de negocio también.

2.2 NORMATIVA

Aunque sea una prueba de ingeniería, y exista gran flexibilidad a la hora de diseñar y fabricar, a continuación, se expone la reglamentación y restricciones obligatorias de diseño impuestas por la organización de MotoStudent y que hay que tener en cuenta para nuestro diseño.

Artículo 2: Requisitos generales de diseño

B.2.1 Dimensiones

Las dimensiones de la motocicleta son gratuitos, a excepción de los siguientes requisitos básicos.

B.2.1.1 La anchura mínima entre los extremos de los semi-manillar debe ser de 450 mm.

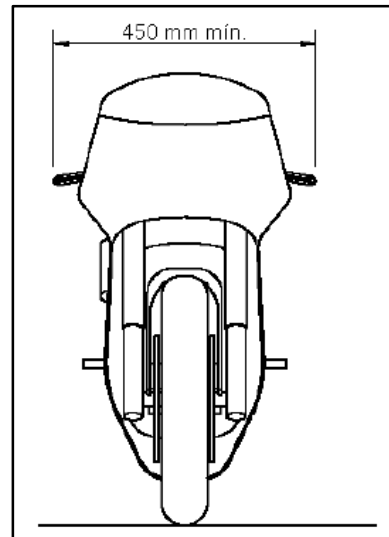


Ilustración 10: Representación gráfica de la norma B.2.1.1

B.2.1.2 El ángulo de inclinación mínimo de la motocicleta sin que ninguno de sus elementos (excepto los neumáticos) toquen la superficie de la carretera debe ser de 50 °. Esta medición se realizará con una motocicleta sin carga (es decir, sin el piloto), pero totalmente equipado, líquidos incluidos, y en condiciones de trabajo.

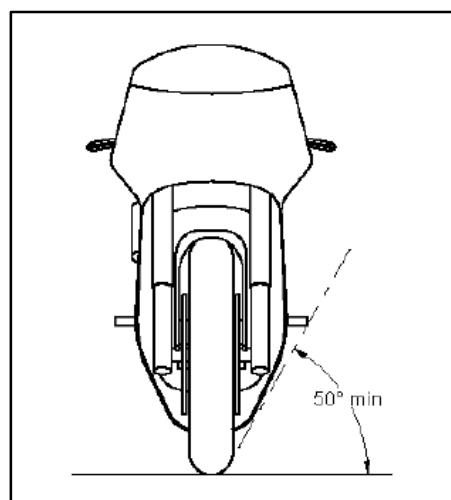


Ilustración 11: Representación gráfica de la norma B.2.1.2

B.2.1.3 La distancia mínima entre la motocicleta en posición vertical y la superficie de la carretera debe ser de al menos 100 mm en cualquier situación de compresión de suspensión o con cualquier geometría de puesta a punto.

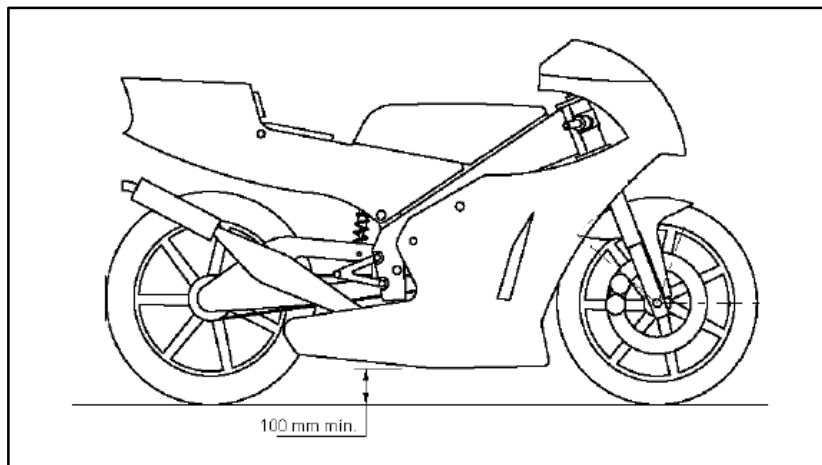


Ilustración 12: Representación gráfica de la norma B.2.1.3

B.2.1.4 Límite delantero: Ningún elemento de la motocicleta deberá sobresalir de la línea vertical frontal dibujado tangencialmente con respecto a la circunferencia externa de la rueda delantera.

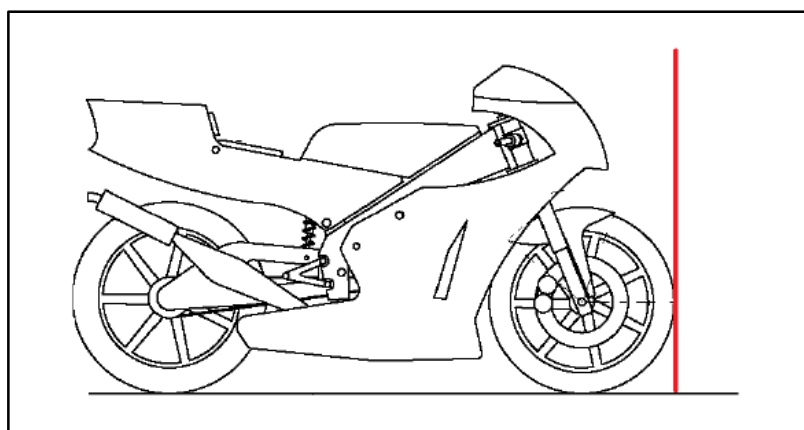


Ilustración 13: Representación gráfica de la norma B.2.1.4

B.2.1.5 Límite trasero: Ningún elemento de la motocicleta deberá sobresalir de la línea vertical trazada tangencialmente con respecto a la circunferencia externa de la rueda trasera.

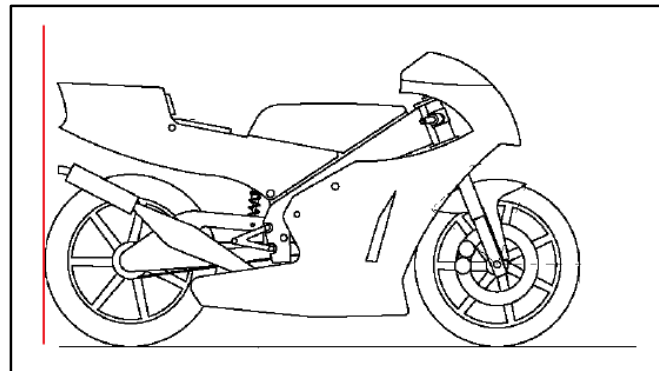


Ilustración 14: Representación gráfica de la norma B.2.1.5

B.2.1.6 Debe haber una distancia mínima de 15 mm entre los neumáticos y cualquier otro elemento de la motocicleta, con la moto en cualquier posición y con cualquier geometría de puesta a punto.

B.2.1.7 La anchura mínima del sillín de la motocicleta no debe superar los 450 mm. Ningún otro elemento de la motocicleta deberá sobresalir de esta anchura del sillín de la motocicleta en la parte trasera, excepto para el sistema de escape.

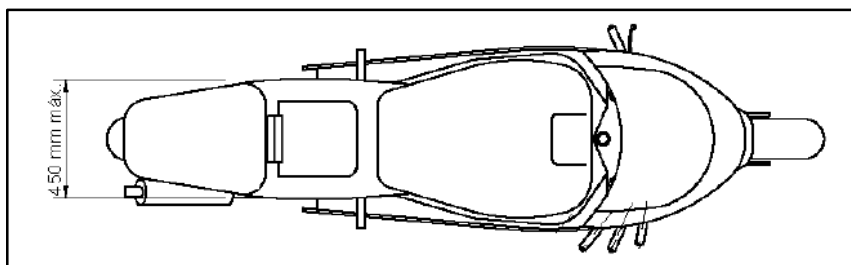


Ilustración 15: Representación gráfica de la norma B.2.1.7

B.2.1.8 La anchura máxima del carenado será de 600 mm.

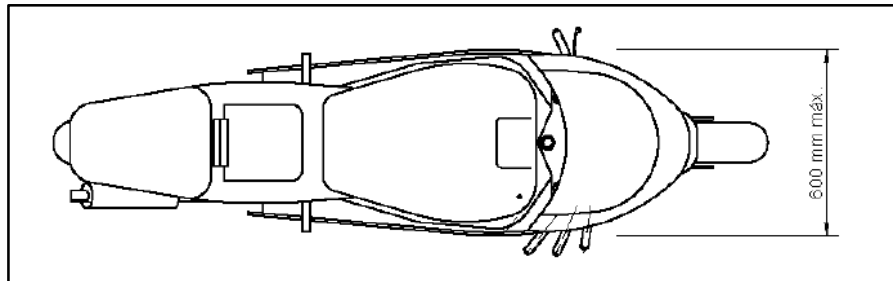


Ilustración 16: Representación gráfica de la norma B.2.1.8

Todos los bordes y acabados del carenado serán redondeados. Radio mínimo 1 mm.

El carenado lateralmente no podrá cubrir al piloto a excepción de los antebrazos (esta excepción solamente en posición de mínima resistencia aerodinámica del piloto). La llanta posterior no podrá cubrir en más de 180°.

Se permitirá el uso de alerones como pieza del carenado. No deben superar la anchura del carenado ni superar la altura de los extremos del manillar. El radio mínimo será de 2 mm.

Se permite el uso de dispositivos móviles aerodinámicos.

B.2.1.9 La máxima diferencia de altura entre la altura del sillín y la parte más alta de la cola debe ser de 150 mm.

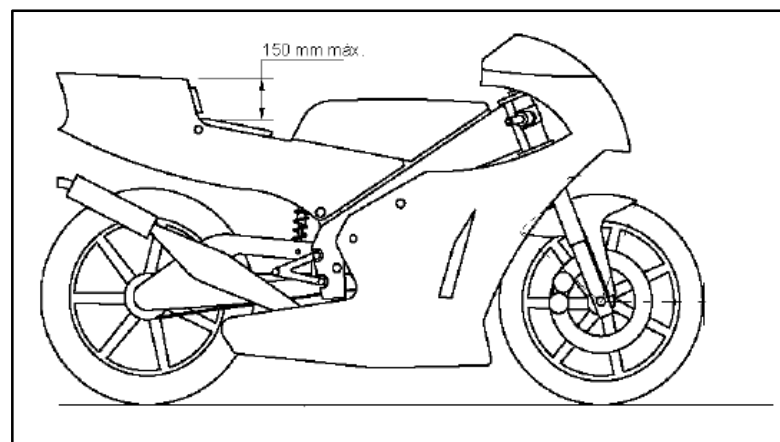


Ilustración 17: Representación gráfica de la norma B.2.1.9

B.2.1.10 La utilización de guardabarros no es obligatoria.

Si se procede a su utilización el guardabarros delantero no podrá cubrir más de 135° de la circunferencia del neumático medido desde la parte posterior del neumático con origen del ángulo en la horizontal que pasa por el eje de rueda.

En esos 135° las dimensiones del guardabarros son libres.

B.2.1.11 La organización suministrará las llantas y neumáticos y prohíbe su modificación.

Las dimensiones son: Delanteras 2.50"x17" y Traseras, 3.50" x 17.

Queda prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en la fabricación de los ejes de ruedas.

Está permitido el uso de protectores de nilón en los extremos del eje para posibles caídas. Estos protectores deben ser redondeados con un diámetro igual o superior al del eje utilizado.

Los ejes de rueda no pueden sobresalir de su alojamiento en sus extremos más de 30 mm. No se consideran, en esta medida, posibles protectores de nilón.

B.2.1.12 Todos los sobraderos de la motocicleta deben redirigirse a un depósito de un mínimo de 250 cm³ de capacidad para evitar el vertido de líquidos (aceite cárter, depósito de gasolina, refrigerante).

2.3 CIRCUITO

La prueba se realizará en una de las configuraciones cortas del circuito de velocidad de Alcañiz (MotorLand Aragón) como se refleja en la siguiente ilustración.



Ilustración 18:
Circuito de velocidad
Motorland

El circuito fue diseñado por Hermann Tilke, uno de los más importantes diseñadores de circuitos del mundo, con la colaboración del piloto de F1 Pedro de la Rosa, asesor técnico del complejo.

Tiene una longitud de 5.345m y una anchura de 12 a 15 metros y ocupa una superficie de 1.320.00m². Cuenta con una recta principal de 1.726m que lo convierte en un referente internacional para la realización de pruebas de aerodinámica.

El desnivel es de 50 mts entre el punto más alto y el más bajo – Máximo: 7,2%.

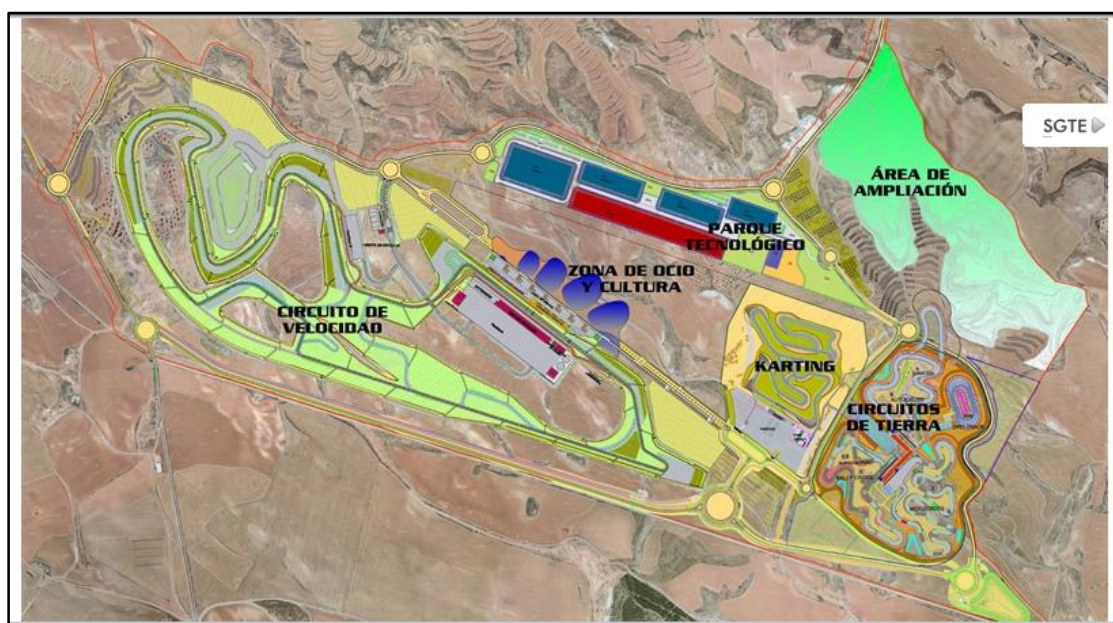


Ilustración 19: Plano de las diferentes configuraciones posibles del circuito de Motorland

Además, este complejo multifuncional permite diferentes configuraciones y la posibilidad de dividirlo en 2 circuitos independientes como seguidamente se aprecia.



Ilustración 20: Posibles trazados del circuito de Motorland

Nosotros utilizaremos el trazado nacional de motos para realizar la práctica.

2.3.1 Ubicación

La Ciudad del Motor (MotorLand Aragón) se construye en un terreno de 3.500.000 m² ubicado a 5 Km de Alcañiz.

Un emplazamiento situado en el centro de un área con 25 millones de habitantes, ya que Madrid, Bilbao, Barcelona, Valencia, Pau o Toulouse se encuentra a una distancia de unos 300 Km.

2.3.2 Información Técnica

Paddock Principal: 44.000 m².

Paddock Secundario: 9.000 m².

Servicio de Restaurante. Salas VIP.

Número de Boxes: 24 de 144 m² y 12 de 96 m².

Aparcamientos: 950.650 m².

Sala de prensa: principal para 270 personas y secundaria para 30 personas.

2.3.3. Datos del circuito

Además del trazado del circuito, debemos tener en cuenta la densidad y viscosidad del aire en el circuito de MotorLand.

Como observamos en la ilustración 8, la temperatura media anual en Alcañiz es de 14,7°C.

Una vez obtenidos los valores de 1 atm y 14,7°C de temperatura, calcularemos la densidad del fluido utilizando la fórmula de los gases ideales.

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

Dónde:

p (presión atmosférica)= 1 atm= 101315 Pa

T (temperatura media anual en Alcañiz)= 14,7°C= 287,7K

R (constante universal de los gases ideales)= 287 J/(kg·K)

Para el cálculo de la viscosidad dinámica utilizamos la fórmula de Sutherland.

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S}$$

Dónde:

μ (viscosidad dinámica del gas)

μ₀ (viscosidad de referencia en la temperatura de referencia)= 1,71 · 10⁻⁵N·s/m²

T (temperatura del gas)= 14,7°C= 287,7K

T₀ (temperatura de referencia)= 0°C= 273K

S (constante de Sutherland para el aire)= 120K



De las anteriores ecuaciones obtenemos la densidad y la viscosidad del aire, respectivamente, en nuestro circuito.

$$\rho = 1,23 \frac{kg}{m^3}; \mu = 1,78 \cdot 10^{-5} N \cdot s/m^2$$

2.3.4. Homologaciones

FIA Automovilismo: Test de Fórmula 1.

FIM Motociclismo: Máxima homologación internacional.



CAPITULO 3. AERODINÁMICA

3.1 INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA

La aerodinámica es la rama de mecánica de fluidos especializada en el cálculo de las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido en el que se desplazan.

Para determinar estas acciones, las cargas aerodinámicas, en esta disciplina, como en todas las ciencias de la ingeniería, es preciso llegar a un compromiso entre la realidad física y las simplificaciones necesarias que exige el tratamiento matemático del modelo del problema.

En aerodinámica, el punto de partida son la ecuación de continuidad, las ecuaciones que expresan el balance de cantidad de movimiento según cada uno de los ejes del sistema de referencia (conocidas como ecuaciones Navier-Stokes en el caso general, y como ecuaciones de Euler cuando los efectos viscosos son despreciables), la ecuación de la energía y la ecuación de estado.

La formulación del problema, que hay que completar con las condiciones de contorno e iniciales apropiadas, resulta ser extremadamente compleja, por lo que es preciso introducir drásticas simplificaciones adicionales si se pretende llegar a modelos matemáticos con solución abordable analíticamente, e incluso numéricamente, en los que el esfuerzo necesario para su resolución no resulte desmesurado.

Como disciplina, la aerodinámica abarca a su vez una amplia variedad de problemas fluido mecánicos, lo que aconseja el establecimiento de estrategias de solución diferentes dependiendo del aspecto dominante de la configuración fluida en estudio.

Quizás la división más obvia sea la que se puede establecer en razón de la forma del cuerpo sobre el que se quieren conocer las cargas aerodinámicas, de manera que atendiendo a la geometría del obstáculo, se puede hablar de una aerodinámica aeronáutica (con sus propias subdivisiones) y de una aerodinámica de cuerpos no aeronáutica, llamada por economía del lenguaje, aerodinámica civil.



Como es natural, la frontera entre ambas ramas de la aerodinámica está poco definida, y los conceptos físicos que se manejan en una y otra vertiente de esta área del conocimiento científico y tecnológico, son análogos.

En la aerodinámica aeronáutica, los cuerpos en consideración son obstáculos fuselados, pensados para perturbar poco la corriente que fluye a su alrededor, diseñados con el criterio de que la capa límite permanezca adherida al cuerpo, evitando en lo posible su desprendimiento. Esto hace factible que, bajo ciertas hipótesis restrictivas adicionales, se puedan formular modelos matemáticos no demasiado complejos que permitan predecir con una aproximación razonable las interacciones entre el obstáculo y la corriente lo rodea.

La solución de estos modelos simplificados de aplicación en la aerodinámica aeronáutica, puede hacerse analíticamente, lo que ocurre en contadas ocasiones, o numéricamente.

Actualmente, las soluciones se basan en dos métodos claramente implantados y de irrefutable solidez. Estos son la simulación computacional y experimentación con el objetivo de validar la simulación. Una vez la simulación es validada, podemos confiar en que las soluciones que alcancemos sean próximas al resultado real final.

3.2 CONCEPTOS DE LA AERODINÁMICA

El principal objetivo es la búsqueda de sustentación negativa para suavizar el diseño en segundo plano, con su consiguiente reducción de la fuerza de arrastre.

Para comprender correctamente los términos aerodinámicos y como pueden influir de manera tan significativa las fuerzas aerodinámicas, la manera más adecuada es observar una sección de un perfil alar.

Asumiendo que la corriente de aire se mueve de izquierda a derecha y debido a la geometría y ángulo de este perfil, el aire se moverá más rápidamente en la superficie inferior. La resultante de la fuerza debida a estas presiones, es lo que llamamos sustentación. Este razonamiento es válido desde un avión de carga hasta el pájaro más pequeño.



Por otro lado, al ser un cuerpo en movimiento inmerso en un fluido, este ofrece una resistencia al avance, que denominamos resistencia aerodinámica o fuerza de arrastre. Esta última fuerza en relación con la sustentación, es normalmente bastante menor.

Dependiendo del campo de la industria donde refiramos esta teoría aerodinámica, se buscará reducir el arrastre, aumentar la sustentación o incrementar la sustentación negativa.

En el caso de las motocicletas, la reducción del arrastre es fundamental para la optimización del consumo de combustible y un aumento de la velocidad punta, lo cual se consigue mediante el suavizado del perfil. Esta optimización se busca en el guardabarros y en el carenado, pero el guardabarros si se trabaja en el proyecto y el carenado no.

Con ello, el objetivo es la maximización de la fuerza de arrastre mediante los alerones.

Un ejemplo claro de la optimización aerodinámica mediante el suavizado de perfiles hacia un perfil alar, es comparar los coeficientes aerodinámicos de dos geometrías comunes. El coeficiente aerodinámico de una esfera es más de 10 veces superior al de un perfil alar. Visualmente, como podemos observar en la siguiente imagen, la diferencia de tamaños a igual coeficiente aerodinámico.

Al igual que el razonamiento de diseño que se ha seguido para el desarrollo del objetivo final del presente proyecto, el carenado es necesario introducir la tercera dimensión a este modelo. Se trata de las fuerzas laterales. Normalmente, a bajas velocidades, este componente se deprecia.

Para el guardabarros de las motocicletas, el punto mas importante es la sustentación negativa, quedando el suavizado del diseño en segundo plano, con su consiguiente reducción de la fuerza de arrastre.

Como se deduce de la explicación anterior, si se diseña un perfil alar invertido la sustentación sería negativa, lo que nos conduce a un mayor rendimiento, especialmente en circuitos con curvas de alta velocidad no peraltadas. La sustentación negativa mejora la adherencia de los neumáticos en curva, lo cual proporciona gran ventaja para aprovechar la potencia del vehículo en todo el recorrido y no solo en tramos rectos.



Todas las fuerzas aerodinámicas expuestas anteriormente son transmitidas a la carretera mediante los neumáticos, y dado a que en definitiva se trata de una fuerza de fricción, la fuerza vertical es decisiva para aumentar la adherencia. Esta viene determinada por el límite de adherencia dependiente del coeficiente de fricción. De este modo, al aumentar la fuerza normal, aumentamos el límite de adherencia.

Este criterio se aplica al freno aerodinámico creado por los alerones.

$$F_{\text{rozamiento}} = N \cdot \mu_{\text{fricción}}$$

Intuitivamente, este se realizaría mediante un aumento de peso, sin embargo, la sustentación negativa permite aligerar la motocicleta aumentando el rendimiento en rectas y no perjudicando la aceleración, garantizando una fuerza normal negativa en curva y suavizando el manejo de la dirección.

3.3. HISTORIA DE LA AERODINÁMICA EN LA COMPETICIÓN MOTOCICLISTICA

Dado la finalidad de este proyecto, es necesario enfocar la aeronáutica con la motocicleta. El objeto de esta investigación es la competición, en este caso por la eficiencia. A continuación, se realizará un análisis del impacto que la aerodinámica ha tenido sobre las motocicletas, especialmente en las de competición.

Louis-Barbilla Perreaux inventó la moto oficialmente con la primera patente registrada en 1868 y modificada hasta 1885. Esta primera moto funcionaba con un motor a vapor, pero en realidad no fue más que un prototipo y nunca llegó a circular de manera autónoma en ninguna carretera.

Fue en el año 1867, cuando Sylvester Howard Roper inventó la primera máquina que alguno podría reconocer como una motocicleta. Roper, un norteamericano, creó una máquina con motor a vapor de dos cilindros. Estas primeras motocicletas usaban carbón como combustible.

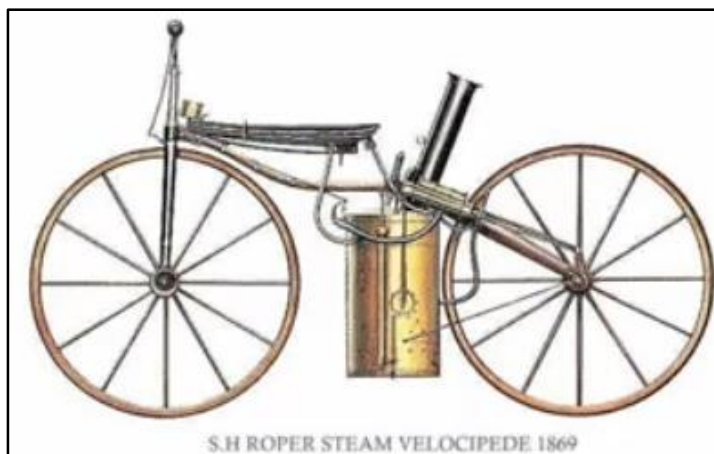


Ilustración 21: Primera motocicleta con motor a vapor

Por tanto, no fue hasta 1885, cuando se inventó la primera motocicleta que entendemos como tal en la actualidad.

Fueron, Wilhelm Maybach y Gottlieb Daimler los que construyeron una moto con cuadro y cuatro ruedas de madera y motor de combustión interna en 1885. Su velocidad era de 18 km/h y el motor desarrollaba 0,5 caballos.



Ilustración 22: Motocicleta con cuadro y cuatro ruedas de madera

Gottlieb Daimler usó un nuevo motor inventado por el ingeniero Nikolaus August Otto. Otto inventó el primer motor de combustión interna de cuatro tiempos en 1876. Lo llamó "Motor de Ciclo Otto" y, tan pronto como lo completó, Daimler (antiguo

empleado de Otto) lo convirtió en una motocicleta que algunos historiadores consideran la primera de la historia.

En 1894 Hildebrand y Wolfmüller presentan en Munich la primera motocicleta fabricada en serie y con claros fines comerciales. La Hildebrand y Wolfmüller se mantuvo en producción hasta 1897.

Los hermanos rusos afincados en París Eugéne y Michel Werner montaron un motor en una bicicleta. El modelo inicial con el motor sobre la rueda delantera se comenzó a fabricar en 1897. A partir de esta fecha, la mayoría de las fábricas que realizaron motocicletas para su comercialización y utilizaban chasis de bicicletas o chasis inspirados en los de bicicletas.

En las siguientes figuras, podemos ver estas motos, de primeros de siglo XX los cuales seguían esta tendencia.



Ilustración 23: Motocicleta NSU 1901



Ilustración 24: Motocicleta Adler de 1902



Ilustración 25: Indian single 1904



Ilustración 26: Motocicleta Harley-Davidson 1907



Ilustración 27: Greyhound 1909



Ilustración 28: The Flying Merkel Model V 1911

En 1902 se inventó el Scooter, pero no como la conocemos en la actualidad, también conocido como auto sillón, por el francés Georges Gauthier. La escúter es una moto provista de un salpicadero de protección.

Fue fabricada en 1914. Tuvo una gran popularidad, sobre todo entre los jóvenes. Incorpora dos ruedas de poco diámetro y un cuadro abierto que permite al conductor estar sentado en vez de inclinado.

También tiene una carrocería que protege todos los mecanismos, y ofrece algún pequeño espacio de almacenaje de objetos pequeños y de una rueda de recambio. Son vehículos urbanos, aunque también se pueden hacer viajes largos. Lo que destaca en este tipo de motos es la comodidad del manejo y facilidad de conducción, y no el desarrollo de grandes velocidades.



Ilustración 29: New Era de 1912



Ilustración 30: Indian V-Twin de 1914

En 1910 apareció el sidecar, un carro con una rueda lateral que se une a un lado de la motocicleta. Consta de un bastidor (de una sola rueda) y de una carrocería que protege al pasajero. La motocicleta que lo arrastra, se convierte en un vehículo

de tres ruedas y su conducción se controla mediante el giro del manillar, al no poder ejecutarse la basculación.

Ya había aparecido años antes, pero en bicicletas y con la proliferación de los vehículos llamados "utilitarios", además de la prohibición de su fabricación por los gobiernos recientemente, han desaparecido prácticamente de la circulación.



Ilustración 31: Sidecar Harley Davidson Model 11J de 1915

Después de volver de la Segunda Guerra Mundial (1945), los soldados estadounidenses parecían descontentos con las motocicletas que eran construidas por Harley-Davidson e Indian.

Las motos que habían montado en Europa eran más ligeras y más divertidas de conducir. Estos grupos se dieron cuenta que sus motocicletas necesitaban los cambios que Harley no les proporcionaba. Así nació la Motocicleta Custom.



Ilustración 32: Inme R100 de 1948



Ilustración 33: Harley Davidson FL HydraGlide 1949

Como hemos podido observar, desde que aparece la primera moto hasta finales de los años cuarenta, las motocicletas van evolucionando, pero en temáticas como motor, chasis, suspensiones etc, pero en aerodinámica aún no, ya que el concepto de aerodinámica todavía no se había introducido en el mundo de la motocicleta.

Hay que resaltar, que en todo este periodo, la motocicleta en Europa, aunque la primera motocicleta es europea, en el periodo de las dos Guerras Mundiales y en el periodo de entre guerras, estas sufren poca evolución. Tendrá que esperarse a finales de los años cuarenta y principio de los cincuenta cuando las motocicletas en Europa evolucionan en gran medida y se empieza a utilizar la aerodinámica en competición y poco a poco, esa influencia se empieza a introducir en las motos de calle, como se puede apreciar en la motocicleta de la imagen, la AJS E95 500 Racer de 1953, en la cual se comienza a introducir el concepto aerodinámico de tener un carenado que cubra el motor y un final de motocicleta redondeado para un mejor perfil aerodinámico. Estas son el comienzo de las motos deportivas de perfil aerodinámico que conocemos hoy en día como motos sport.



Ilustración 34: AJS E95 500 Racer 1953

3.3.1 Los orígenes de la aerodinámica en la motocicleta

Los marcas de motos siempre habían tenido muy presente esta configuración aerodinámica, ya que era el sistema habitual equipado en los modelos destinados a batir récords de velocidad en la década de los treinta.

En realidad, Gilera experimentó con carenados completos en sus primeras tetracilíndricas de 500 cc sobrealimentados. Sin embargo, lo abandonaron cuando Dorino Serafini ganó el Campeonato de Europa el año 1939.

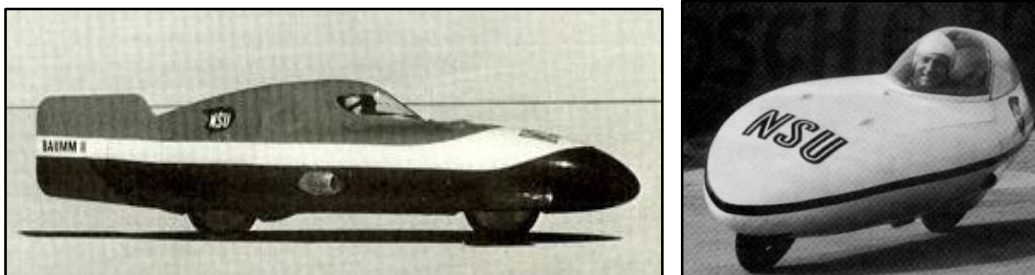


Ilustración 35: NSU “Flying Hammock” de 125cc a través del lago salado de Utah a 240 km/h, una de las motos más aerodinámica que se han construido

Después de la II Guerra Mundial, los primeros que volvieron a prestar atención en materia aerodinámica fueron las marcas italianas, en concreto en la categoría de 125 cc.

Con mecánicas de sólo 12 CV, rápidamente descubrieron que los carenados "dustbin" les ofrecían la posibilidad de incrementar las prestaciones máximas, lo que significaba un aumento importante de las ganancias obtenidas en los costosos desarrollos de los motores.

Desde luego, las ventajas desaparecían en los circuitos más lentos, debido al peso adicional que suponían, las limitaciones que ofrecían a la movilidad de los pilotos y al mayor esfuerzo que se requería de los frenos, al ser mayor el peso del tren delantero en frenadas respecto a los modelos convencionales. Pero en su casa, en Monza, el más rápido de los circuitos del Mundial, la velocidad máxima imperaba y fue entonces cuando se erigieron como los protagonistas de su época.

El desembarco final se produjo en 1950, cuando Mondial construyó una 125 especial para la clásica prueba en el circuito de milanés. Tenía la rueda delantera al descubierto, pero disponía de un carenado tipo delfín con no menos de tres aberturas, mientras que la rueda trasera se encontraba completamente tapada por un colín envolvente. Como esta silueta se situaba en la parte trasera del piloto, en las rectas, moto y piloto formaban un perfecto "huevo", con la rueda delantera como un añadido unido a él.

Con esta moto, Gianni Leoni ganó la carrera a una velocidad media de 131,44 km/h. Ello hizo que las demás marcas prestaran más atención al efecto de la aerodinámica. Moto Guzzi se erigió como líder en este sentido, construyendo su propio túnel de viento.



Ilustración 36: Mondial Gp 125cc

- Moto Guzzi pionera

Sorprendentemente, todo esto ocurrió tres años antes de que ocurriera el boom de los carenados "dustbin" en competición. Moto Guzzi, Gilera, MV, NSU y todas las demás firmas implicadas en las carreras, experimentaron con pequeños carenados que se extendían de delante hacia detrás, rodeando la tija de dirección y por debajo de los brazos del piloto.

Pero el siguiente paso fundamental lo dio Moto Guzzi en 1953. Su inversión en el túnel de viento empezó a dar sus frutos. Aquel año, la marca de Mandello del Lario compitió en las categorías de 250 y 350 cc con motos de propulsor monocilíndrico, y en 500 cc con una revolucionaria cuatro cilindros en sustitución de la ya vetusta V-twin. Para reducir el área frontal, tenía los cilindros en línea en el sentido de la marcha, en lugar de los trasversales preferidos por sus rivales Gilera y MV.

El motor estaba refrigerado por agua y se alimentaba por inyección, con transmisión por cardan y caja de cambios de cuatro velocidades. Se podía definir como un auténtico alarde técnico, a lo que los ingenieros de la marca sumaron el primer carenado integral "dustbin" en toda regla, un modelo como jamás se había visto hasta entonces en ninguna de las tres categorías.

Las dos motos de las cilindradas inferiores tenían carenados tipo delfín similares a los que se emplean hoy día, pero con un pico que se proyectaba por encima de la rueda delantera, mientras que la 500 cc tenía un carenado parecido, aunque sin dicho pico.

Durante aquella temporada, la aerodinámica del modelo de medio litro (que había empezado con una victoria en la prueba, no puntuable para el Mundial, de Hockenheim, pilotada por Enrico Lorenzetti), fue progresivamente evolucionada hasta que en el Gran Premio de Italia en Monza, en septiembre de 1953, lanzaron el primer auténtico modelo "dustbin" que cubría por completo la rueda delantera.



Ilustración 38: NSU Sportmax



Ilustración 39: Gilera

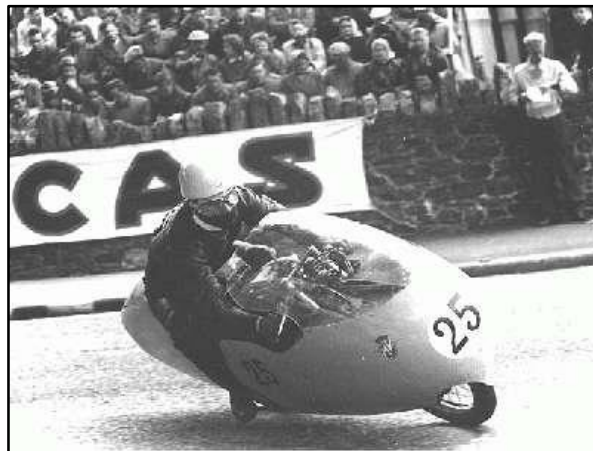


Ilustración 40: MV mencionada anteriormente

Es cierto que BMW había construido un carenado especial para Walter Zeller que exhibía un carenado completo más un colín. Pero mientras que la fábrica alemana lo hacía de forma esporádica, Moto Guzzi se puso manos a la obra de forma exhaustiva y en 1954, tanto la 250 como la 350 cc de carreras llevaban carenados completos de este tipo desde el principio de la temporada.

Todavía no eran los elegantes carenados redondeados de años más tarde, sino modelos bastante rechonchos, una evolución del original desarrollado en la cuatro cilindros de 500 en Monza el otoño anterior.

Por sorpresa, Moto Guzzi la retiró de la competición tras sólo una temporada, sobre todo por los problemas de empuje lateral que generaba el cigüeñal longitudinal, lo que complicaba su manejabilidad en circuitos revirados.

Las otras marcas también entraron en esta guerra, excepto AJS y Norton (ambas, por entonces, miembros del grupo AMC), que declararon que no iban a emplear estos carenados porque no interesaban a los propietarios de sus modelos de serie. Esto no evitó que Norton equipara un curioso carenado de delfín en sus motos del equipo oficial de Ray Amm. Tenía un pico largo que llegaba hasta más allá del extremo de la rueda delantera.

Por otro lado, el progreso que logró NSU era obvio. La firma germana comenzó el año 1954 con un modelo delfín que incluía un pico muy similar al de Guzzi. Sin embargo, en el Duth TT de julio incorporaron una nueva pieza que cubría en su totalidad el tren delantero. Era un prototipo muy rudimentario y ya en septiembre, en el

GP de Italia en Monza, se sustituyó por un precioso carenado en una pieza de aluminio con una gran cúpula y paneles laterales que contenían los brazos del piloto.

Gilera también siguió esta técnica, aunque sus diseños tenían cúpulas más reducidas y los brazos del piloto se dejaban expuestos al aire. Geoff Duke dio la victoria a la firma de Arcore en su debut en Monza en 1954 a una media de 178,34 km/h, con una vuelta récord a una media de 180,86 km/h. Por su parte, MV fue más lenta en su evolución el año 1954. Intentaron varias fórmulas, ninguna de ellas lo suficientemente convincentes frente a la competencia.

A principios de año acoplaron una pequeña estructura tipo delfín, después un curioso "medio dustbin", como un pequeño barco boca abajo que llegaba a cubrir la rueda delantera, pero que la dejaba al aire vista desde el lateral.



Ilustración 41: Norton 500 anteriormente mencionada

- La época dorada

A principios de la temporada 1955 (por entonces, Norton, AJS y NSU habían dejado de participar de forma oficial en el Mundial), los diseños de cada uno ya estaban sólidamente establecidos. En los circuitos más rápidos se prefería cubrir por completo la rueda delantera y los diseños se habían vuelto más estilizados, aunque los pilotos seguían con sus quejas en cuanto a la manejabilidad, especialmente cuando el viento azotaba la pista.



Los planes de MV se trastocaron totalmente cuando su nuevo líder, Ray Amm, sufrió un fatal accidente en Imola en su primera aparición con la firma italiana. Sucedió con una moto equipada con un completo "dustbin" en la carrera de 350 cc y se encontraba en segundo lugar, ya a tiro de piedra del liderato.

MV no se recuperó hasta final de temporada cuando el anterior piloto de Gilera Umberto Masetti, logró la victoria en Monza batiendo por sorpresa a Reg Armstrong y Geoff Duke sobre las, hasta entonces, imbatibles Gilera. Sólo 1,6 segundos separaron a estos tres pilotos en la línea de meta. A pesar de ir tan rápido con esta clase de carenados, no consiguieron ganar, como consecuencia que el carenado generaba demasiada carga sobre la horquilla, empujándola hacia abajo, lo que provocaba que el neumático delantero se gastara en exceso.

El problema desapareció colocando unos topes bajo los muelles que endurecían la suspensión y eliminaba la tendencia a bajar el morro. Más tarde, Gilera movió hacia atrás la posición de sus motores para contrarrestar este efecto aerodinámico.

En 1956, los pilotos privados también se subieron al carro de los "dustbin". Empezaron a aflorar multitud de copias de los diseños de las fábricas oficiales. Así, se podían ver Norton, AJS, NSU, Horex, etc. Uno de los primeros, una fiel copia de una Gilera, fue construido por el suizo Hans Haldmann, amigo de Luigi Taveri, sobre una rapidísima Norton pilotada por él mismo. Aquella moto fue posteriormente comprada por el australiano Keith Campbell.

Casi la práctica totalidad de los pilotos punteros en las cuatro categorías del Mundial llevaban estos carenados integrales; sólo Geoff Duke y John Surtees (éste se acababa de incorporar al equipo MV) optaban a menudo por semicarenados para los circuitos más lentos: Duke porque se sentía más cómodo pilotando su Gilera con este equipamiento, y Surtees porque la MV sufría de problemas por sobrecalentamiento con este carenado cerrado.

Aquella temporada se vio enrarecida por la retirada de sus licencias a Duke y Armstrong durante seis meses por su apoyo a los pilotos privados en sus reivindicaciones sobre las primas de salida en el Duth TT del año anterior. Cuando volvieron a la competición, Surtees y su MV ya tenían casi el título en sus manos, mientras que en las otras tres categorías, las motos con carenados "dustbin" imperaban sin oposición. Sólo en la parte trasera de las motos había diferencias. Las marcas que competían en 125 y 250 cc preferían colines aerodinámicos. En cambio,

las que participaban en 350 y 500 cc decidieron que cerrar esta zona no ofrecía ninguna ventaja.

- El principio del fin

Estos éxitos no significaron que los carenados completos anteriores fueran aceptados por todos. El debate era continuo.

Las respuestas negativas fueron ganando adeptos. La situación llegó a su límite cuando Roberto Colombo, el piloto oficial MV en las categorías inferiores, sufrió un accidente mortal en el GP de Bélgica. Se echó la culpa a estos diseños aerodinámicos y el órgano directivo de la competición, la FIM, acabó con años de controversia prohibiendo los "dustbin" a finales del año 1957.

Moto Guzzi, que poseía túnel de viento propio, y principal instigadora para que no se llevase a cabo la prohibición, llevó a las competiciones de récord en 1957, la ocho cilindros oficial (que sustituyó a la poco longeva cuatro cilindros) en configuración de carreras, estableció el récord mundial de 10 km desde salida parada con una velocidad media de 243,51 km/h, con un máximo de 286,45 km/h en el último kilómetro.

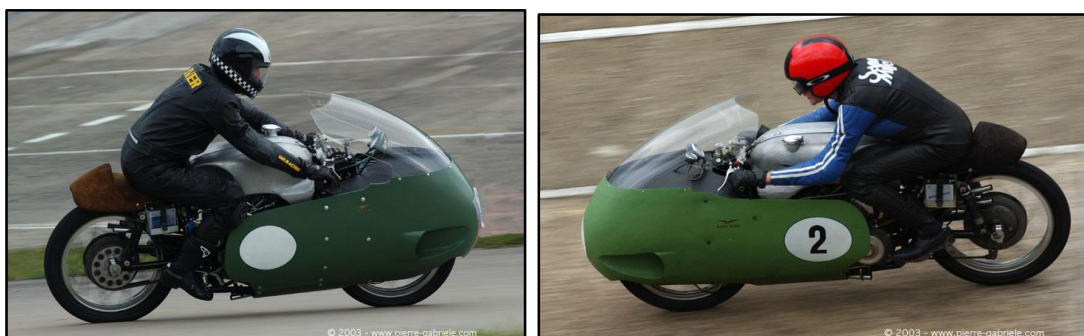


Ilustración 42: Moto Guzzi V8 anteriormente mencionada

Pero la mayoría estaban de acuerdo con esta medida. Era más barato tanto para las marcas como para los equipos privados, y significaba una pieza menos susceptible de romperse.

De lo que no hay duda, es que las carreras se hicieron más seguras y, quizás lo más importante de todo, los espectadores pudieron volver a ver motos de verdad de nuevo.

Los principales problemas que tenían estos carenados, a parte del tema económico y que no todas las marcas poseían túnel de viento, era su problemática en carreras con fuertes vientos laterales o racheados, que al tener tanta superficie,

provocaban grandes fuerzas que tiraban a los pilotos al suelo, haciendo de estas, unas motos muy peligrosas e inestables, que ponían en gran peligro la vida de los pilotos.

Los problemas que provocan los vientos laterales en los carenados los explicaremos más adelante. Otro de los problemas que tenían estos carenados, eran que en circuitos con curvas lentas, muy revirados, con bajas velocidades, la ventaja que aportaban desaparecía, ya que a baja velocidad, las ventajas aerodinámicas no servían, y las hacían motos lentas y menos ágiles que motos sin carenado.

Tras la prohibición de la FIM y de la estricta reglamentación en términos de aerodinámica en competición, toda esta evolución se estancó y las motos de primeros de los años sesenta en adelante no sufren gran variación.

Podemos observar en la siguiente imagen la Honda 250 cc en el TT de 1961 en la cual no existen grandes variaciones en el carenado con respecto a las actuales, como se puede observar en la siguiente Moto 3 de la temporada 2012. La mayor novedad es que incorporan guardabarros, que a mediados de siglo muy pocas motos de competición los llevaban.



Ilustración 43: Honda 250cc de 1961



Ilustración 44: Moto 3 2012 Equipo Blu sens Pacha de Maverick Viñales

Hay que añadir, que en la temporada 2011 de Moto GP, el equipo Ducati oficial y su equipo privado utilizaban una Desmosidici GP11 con la que corrían el mundial de Moto GP en la cual utilizaban unos alerones que se pueden observar en las siguientes imágenes con los cuales los ingenieros de Ducati intentaban solucionar los graves problemas que tenía la Ducati de Valentino Rossi con el tren delantero el cual tenía problemas de poco apoyo, problemas que entre otros, les llevaran al fracaso en el campeonato.

Estos alerones, muy sonados dentro del mundial, novedosos, ya que ningún equipo los llevaba, no consiguieron solucionar los problemas de la moto y la fuerte reglamentación de aerodinámica conllevaron que decidieran dejar de usarlo en el campeonato de la temporada 2012.



Ilustración 45: Desmosidici motoGP 2011 donde se pueden observar los alerones



Ilustración 46: Karl Abraham, Ducati GP 11 campeonato MotoGP del 2011 donde se aprecian los alerones

Hay que añadir que no solo la competición ha introducido el concepto del alerón en las motocicletas, ya que BMW ya la introdujo en su R100RS de serie para su modelo comercial por primera vez en las motos comerciales.

La BMW R100 RS se comenzó a comercializar en 1980, he introdujo el concepto del alerón junto a una transmisión en vez de por cadena por cardán. BMW introduce los alerones para reducir la pérdida de carga en la rueda delantera debido a la fuerza de sustentación que se genera, fenómeno que más adelante explicaremos.

Podemos ver en la fotografía la superficie plana que está dentro del cuadrado rojo inclinada hacia atrás en la zona de encima de las manos y también la aleta lateral que comienza justo detrás de la parte superior de la rueda delantera.



Ilustración 47: BMW R100 RS de 1980

3.4 AERODINÁMICA EN AVIACIÓN

Resulta inevitable relacionar la aerodinámica con la aviación, debido a la desproporción de recursos dedicados en el pasado y en el presente a la investigación y al desarrollo de esta rama de la aerodinámica.

Para iniciar la descripción y cálculo de las cargas aerodinámicas sobre una aeronave en vuelo, posiblemente el primer paso deba ser la definición de un sistema de ejes al que referir dichas cargas.

Como es sabido, cualquier sistema de cargas se puede reducir a una fuerza y a un momento aplicado en un punto, cuyos componentes varían según el sistema de ejes que se adopte como referencia. En el cálculo de las acciones del viento sobre un cuerpo que se mueve horizontalmente con cálculo de las acciones del viento sobre un cuerpo que se mueve horizontalmente con velocidad U_{∞} a través del aire en calma, se suele adoptar un triedro de referencia ligado al cuerpo de modo que en este sistema el cuerpo está en reposo, y es el aire el que incide sobre el cuerpo con velocidad U_{∞} . En el triedro de referencia elegido, el eje que incide sobre el cuerpo con velocidad U_{∞} . El



eje z está contenido en un plano vertical, está dirigido en sentido opuesto al de la gravedad terrestre (hacia arriba) y forma un ángulo de $\pi/2$ con eje x.

Por último, el eje y se define de modo que el sistema de ejes forme un triedro a derechas, tal como se indica en la siguiente imagen.

Este sistema se denomina ejes de viento, y la proyección de la fuerza resultante sobre el eje x recibe el nombre de resistencia aerodinámica, D (llamada también fuerza de arrastrarse en algunos textos, sobre todo en aquellos que tratan de aerodinámica civil).

Se llama sustentación, L, a la proyección correspondiente al eje z, y fuerza lateral, F_y , a la del eje y; de igual modo los componentes del momento según los ejes del triedro de referencia (M_x , M_y , M_z , respectivamente) se conocen con los nombres de la correspondiente: momento de guiñada la del eje x, momento de guiñada la del eje z, y momento de cabeceo la proyección sobre el eje y (en inglés roll, yaw y pitch respectivamente). Como es habitual, se adopta el criterio de que estas magnitudes son positivas cuando su sentido coincide con el sentido positivo del eje correspondiente

3.5 EL PERFIL ALAR. PERFILES NACA

Insistiendo en el punto antes explicado sobre el bajo coeficiente que presentan los perfiles alares, resulta inevitable deducir que los apéndices aerodinámicos presentan esta geometría.

La sustentación negativa se incrementa con apéndices aerodinámicos, siendo especialmente importantes los situados en los ejes delantero y trasero. En nuestro caso, los situaremos en el guardabarros del eje delantero. Estos apéndices incrementan el área total expuesta a la corriente fluida, aumentando la fuerza de arrastre. Es una de las razones por las que se eligen este tipo de perfiles. La otra razón fue explicada en el subcapítulo 3.3 referente al perfil alar invertido.

El estudio de secciones alares ha sido tradicionalmente en su mayoría, empírico. Las pruebas más recientes empezaron a indicar la preferencia de un borde de ataque redondeado y de un borde de salida afilado. La inminente demanda de alas mejoradas para nuevos aviones y la falta de una teoría general afianzada, provocó una serie de pruebas sobre gran cantidad de perfiles diferentes, mejorando su geometría gradualmente como resultado de la experiencia.



Los perfiles más modernos se vieron desarrollados en gran parte, durante la Primera Guerra Mundial, a partir de una serie de pruebas en Gottingen. Durante la Segunda Guerra Mundial continuaron en numerosos países las pruebas de diferentes familias de perfiles alares derivados de lo investigado en la Primera Guerra Mundial. Sin embargo, el trabajo realizado por la NACA era el más avanzado.

Sus investigaciones eran mucho más sistemáticas basándose en los efectos de la distribución del espesor a lo largo de la cuerda y la curvatura.

La Naca (National Advisory Committee for Aeronautics: Comité Consejero Nacional para la aeronáutica) fue una agencia federal de Estados Unidos fundada en 1915 para emprender, fomentar e institucionalizar las investigaciones aeronáuticas. En 1958 pasó a ser el núcleo de la actual NASA (National Aeronautics and Space Administration: Administración Nacional de la Aeronáutica en el Espacio).

Los perfiles investigados por la NACA son los actualmente utilizados en la industria aeronáutica. Es por esto, que se describirán únicamente tales perfiles.

La familia de perfiles generados resultan de la combinación de la forma de la línea de curvatura media y las distintas distribuciones de espesores a lo largo de esta.

La anterior imagen aclara ciertos términos que se utilizan en el texto. Los llamados borde de ataque y borde de salida son las extremidades anterior y posterior respectivamente, de la línea de curvatura media. La cuerda es la línea recta que une ambos bordes. Las ordenadas del perfil curvo se obtienen proyectando perpendicularmente la distribución de espesores sobre la línea de curvatura media.

Para describir más técnicamente este punto, nombraremos las abscisas, las ordenadas y los ángulos de la línea media como X_c , Y_c , y Θ respectivamente. Si X_s e Y_s representan las coordenadas de un punto del extradós de la sección y Y_t es la ordenada de la distribución simétrica para cada x sobre la cuerda, las coordenadas del extradós se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$X_s = X - Y_t \sin \Theta$$

$$Y_s = Y_c + Y_t \cos \Theta$$

Por consiguiente, para el intradós:

$$X_i = X + Y_t \sin \Theta$$

$$Y_i = Y_c - Y_t \cos \Theta$$



El punto de partida del radio que define el borde de ataque se obtiene dibujando una línea en el extremo frontal de la cuerda con la misma pendiente que la línea de curvatura media en ese punto y desde ahí, un arco que defina el borde de ataque.

Esta construcción causa que los perfiles curvados se proyecten más lejos del extremo frontal de la cuerda. Por otro lado, debido a que la pendiente en el extremo frontal de la cuerda es teóricamente infinito (dado que la línea media es finita en ese punto), se toma habitualmente la pendiente de la línea media en el punto $x/c = 0,005$. Esta simplificación se justifica por la forma en la que la pendiente tiende a infinito y según la relación x/c se acerca a 0. Los grandes valores obtenidos en valores próximos al cero, son despreciados en la generación de perfiles.



CAPITULO 4. CAD

4.1 DISEÑO CAD

Para la creación de los modelos CAD y su posterior simulación en Fluent, utilizaremos uno de los programas CAD existentes actualmente, **PTC-Creo 2**, anteriormente conocido como PRO-Engineer.

Utilizamos este software para el desarrollo tanto del guardabarros como de los alerones. La organización de la competición Motostudent, obliga a la realización de todos los modelos CAD con este software y además, en los ordenadores de la universidad, ya que son los que tienen la licencia educativa de este programa.

Creo Elements, es una solución integrada que engloba tanto software CAD , CAM y CAE 3D. Este software, es utilizado en la ingeniería mecánica tanto en diseño como en fabricación.

En el mercado, no sólo existe este software dedicado al diseño asistido por ordenador, pero es uno de los más utilizados ya que las licencias son más baratas comparándolo con CATIA, y son muy parecidos.

El software fue creado por el Dr. Samuel P. Geisberg a mediados de la década de 1980, bajo el nombre de Pro/ ENGINEER. Fue la primera restricción basada en reglas con éxito de la industria (a veces llamada ‘paramétrica’ o ‘variacional’) de sistema de modelado en 3D.

El modelado paramétrico utiliza parámetros, dimensiones, características y relaciones para simular el comportamiento previsto del producto y crear un modelo que permite la automatización del diseño y la optimización de los procesos de diseño y desarrollo de productos.

Este enfoque de diseño es utilizado por empresas cuyo producto es la estrategia basada en el desarrollo e innovación de productos. En una estrategia de diseño, es fundamental para el éxito del proceso de diseño la incorporación de las limitaciones de ingeniería y relaciones para optimizar rápidamente el diseño, o donde la geometría resultante puede ser compleja o esté basada en ecuaciones muy complejas.



Ilustración 48: Logotipo de PTC

Pro / ENGINEER proporciona un conjunto completo de capacidades de diseño, análisis y fabricación en una, plataforma escalable integral. Estas capacidades necesarias incluyen modelado de sólidos, la interoperabilidad de datos, diseño de sistemas dependientes, simulación, análisis de la tolerancia, NC y diseño de herramientas.

Las empresas utilizan actualmente Creo 2, para crear un modelo digital 3D completo de sus productos. Los modelos se componen de datos 2D y 3D de modelo que también se pueden utilizar en el análisis de elementos finitos, creación rápida de prototipos, herramientas de diseño, y fabricación CNC. Todos los datos son asociativos e intercambiables entre los módulos CAM sin CAD, CAE y conversión.

Un producto y toda su lista de materiales (BOM) se pueden modelar con precisión totalmente asociativas dibujos de ingeniería, y la información de control de versiones. La funcionalidad de la asociatividad en Creo Elements / Pro permite a los usuarios realizar cambios en el diseño en cualquier momento durante el proceso de desarrollo de productos y actualizar automáticamente los elementos subsecuentes. Esta capacidad permite a la ingeniería concurrente (el diseño, análisis y fabricación ingenieros que trabajan en paralelo) y agiliza los procesos de desarrollo de productos.

Creo Elements / Pro es parte de un sistema de desarrollo de productos más amplio desarrollado por PTC. Se conecta a otras soluciones de PTC en el desarrollo de productos de ayuda, incluyendo vientos helados, ProductView, Mathcad y Arbortext.

4.2 CREACIÓN DEL MODELO CAD EN 3D DE GUARDABARROS Y ALERONES.

4.2.1 Guardabarros

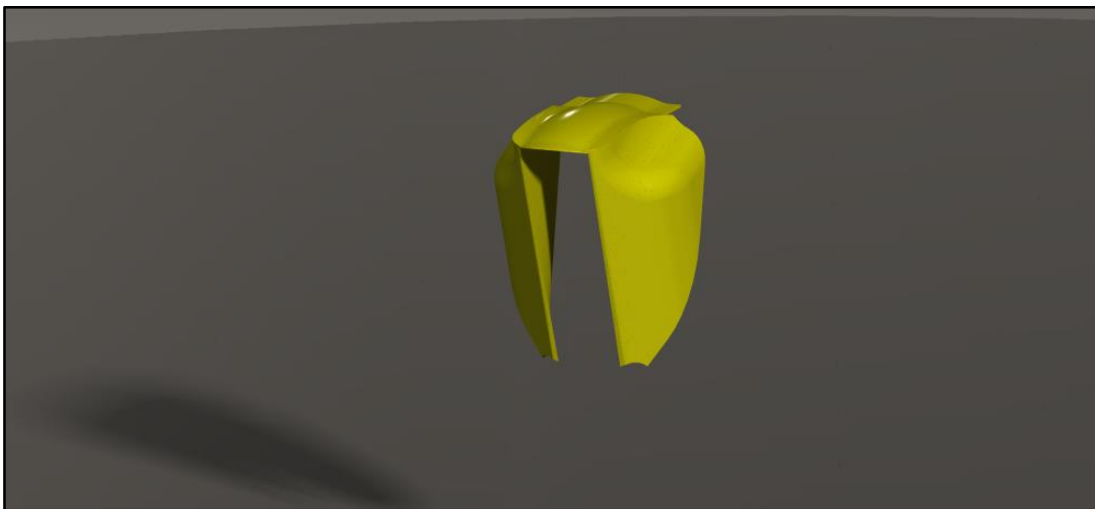


Ilustración 49: Guardabarros realizado en Creo2

Para el diseño del guardabarros, se tiene en cuenta:

- a) Los parámetros de partida de la suspensión delantera de la moto, ya que es donde va instalado el guardabarros y tiene que cubrir tanto las horquillas como rodear a la rueda cumpliendo las distancias mínimas de seguridad.
- b) La normativa vigente de la competición expuesta en el capítulo 2 para cumplir todas las exigencias y poder fabricar e incorporarlo a la motocicleta.

Como se puede observar en la imagen, la parte de atrás del guardabarros no está diseñada en CAD. Esto se debe, a que la parte final del guardabarros no contribuye al flujo aerodinámico, y por tanto, no es necesario para la simulación. Esto facilita un menor mallado, un menor número de nodos, y esto conlleva una reducción de horas de simulación.



Ilustración 50: Motocicleta de Luis Salom

Para el diseño del guardabarros, se tomó como referencia el guardabarros que actualmente se están utilizando en el Mundial de Moto 3, que actualmente, aunque bajo una rígida normativa, cada vez se va teniendo más en cuenta la importancia de la aerodinámica, y más si cabe, en las pequeñas cilindradas. Esto se puede observar en la presente imagen.

En este proyecto, si expondremos los pasos a seguir en el Pro Engineer para la elaboración del modelo en 3D del guardabarros, ya que este proyecto se centra en la simulación aerodinámica de los alerones, y también del diseño y simulación del guardabarros. Todos los datos los tendremos presentes en los resultados.

4.2.2 Alerones

Con respecto a la modelización de los alerones tendremos presente varios puntos en su diseño:

- a) Cumplir las exigencias de la competición.
- b) Cumplir nuestras exigencias físicas y centrarnos en nuestro objetivo, que es conseguir el máximo **drag** posible, que nos produzca la mayor fuerza vertical en la frenada para reducir la distancia de frenada.

Para su diseño, tendremos en cuenta los perfiles aerodinámicos y la experiencia con respecto a este punto en otras competiciones y ramas de la ingeniería. Limitar nuestro rango de estudio y reducir así las horas de simulación.

Todo lo que concierne al planteamiento teórico para la modelización de los alerones, se expuso con anterioridad en este proyecto.

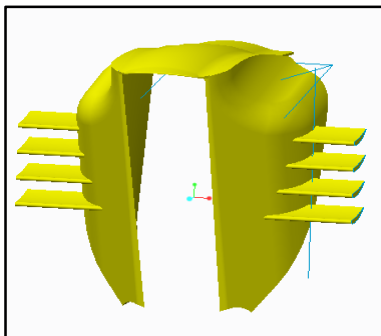


Ilustración 51: Guardabarros con alerones

En Pro Engineer crearemos los alerones en 3D, los implementaremos junto con el guardabarros, aunque en la simulación los estudiaremos por separado. Se crearán diferentes modelos, variando tanto en la geometría como en el ángulo de ataque. También se realizarán modelos en 2D para su simulación, pero esto no se podrá diseñar en Pro E, sino que se diseñara en el CAD de Ansys Workbench.

En este capítulo, explicaremos de forma breve todos pasos a seguir en la modelización de un alerón, desde cero hasta su resultado en 3D con un ejemplo.

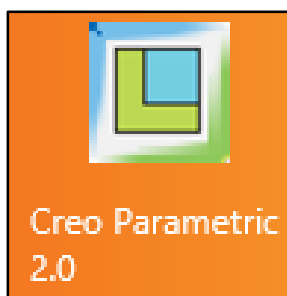



Ilustración 52: Logotipo Creo Parametric 2.0

El **primer paso**, una vez que ya tenemos un diseño en papel del alerón, es abrir el programa Creo 2.0 Parametric. Hay que tener especial cuidado en este punto, ya que Creo 2, tiene diversos módulos dentro de su carpeta y sirven para lo mismo.

Por tanto, para la modelización en 3D, hay que abrir el anterior mencionado. Crear un proyecto nuevo como PART, ya que únicamente se creara una pieza, no ningún conjunto. Una vez realizado esto, se podrá comenzar con el diseño en sí mismo.

El **segundo paso**, es diseñar un esbozo en 2D. Para esto, pulsaremos en la casilla de esbozo  Esbozo. Una vez pulsada, nos saldrán las diferentes herramientas para el diseño del alerón, y realizaremos esto respetando nuestras medidas.

Para un diseño más fácil, lo mejor es crear cada línea con sus unidades reales, así cada paso que damos en el diseño ya será el final, y por tanto, los problemas que nos van saliendo en el proceso, serán los reales. De esta forma evitaremos problemas al final del diseño de incompatibilidades entre segmentos, curvas etc. Un ejemplo de esbozo se puede apreciar en siguiente imagen.

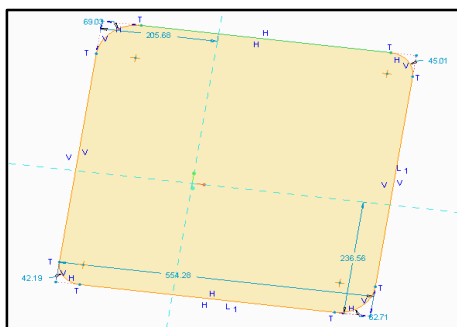
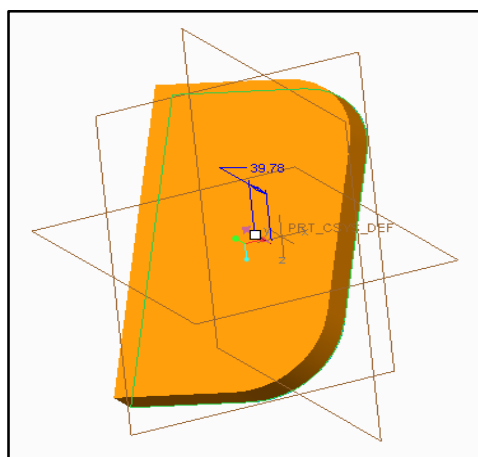


Ilustración 53: Esbozo del diseño

El **tercer paso**, una vez que ya tenemos nuestro esbozo con nuestras medidas reales, es crear de ese esbozo una extrusión. Por tanto, pulsamos en la casilla de



Extruir extrusión, seleccionamos nuestro esbozo, en la ventana que nos aparece, damos la profundidad y dirección en la que queremos extruir nuestro boceto, y ya, tendremos nuestro modelo en 3D como se puede apreciar en la imagen.

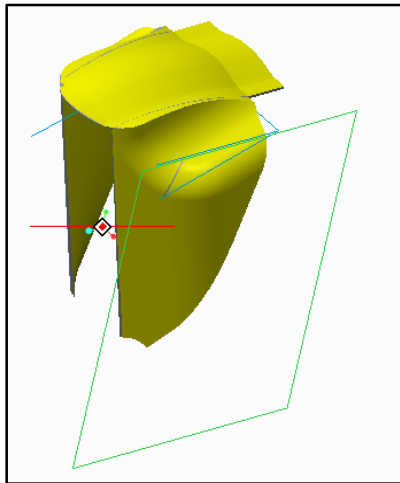


En este apartado, hay que tener en cuenta que el boceto, tiene que estar cerrado, es decir, no se pueden extruir superficies abiertas. La dirección a la hora de hacer la extrusión, al crear los alerones, no es importante, pero en otros casos, como al crear los alerones en los guardabarros, es algo que hay que tener muy en cuenta. Al igual ocurre con la profundidad, es decir, con el espesor de nuestro alerón.

Ilustación 54: Extrusión

Hay que tener especial cuidado al crear el proyecto en Creo 2, ya que hay que seleccionar las unidades en milímetros, porque vienen predefinidas en pulgadas lo que conllevaría a que todos nuestros cálculos y simulaciones serían erróneas. Todos los modelos que después se simularán se harán de esta forma anteriormente mencionada.

Para los modelos en 2D, únicamente se realizará la parte del esbozo. Para los modelos en los cuales los alerones están colocados en el guardabarros, la técnica de diseño es distinta.



Para su diseño, hay que crear un plano paralelo a uno de los laterales del guardabarros, tangente a su superficie, como se puede observar en la siguiente imagen en la que se ve el guardabarros y además, en verde el plano tangente a la superficie y separado una cierta distancia del guardabarros.

Una vez creado el plano, se crea un boceto seleccionando el plano de la imagen. En el boceto dibujamos el perfil que queramos para nuestro alerón o alerones, y a continuación, realizamos una extrusión.

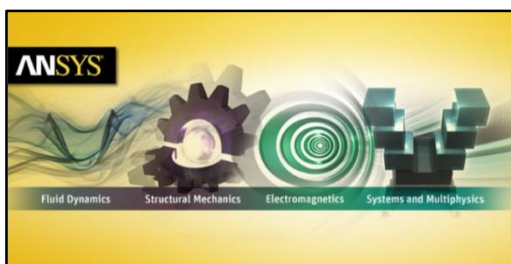
Ilustración 55: Plano paralelo al guardabarros

Para la extrusión seleccionamos la dirección hacia el guardabarros, y la profundidad tal que corte con la pared de la pieza pero no corte la pieza por dentro.

Luego por simetría, creamos de forma simultánea los alerones del otro lado del guardabarros.

CAPITULO 5. CAM, ANSYS FLUENT

5.1 SIMULACIÓN DE FLUIDOS ALREDEDOR DE CUERPOS MEDIANTE ANÁLISIS COMPUTACIONAL



ANSYS FLUENT ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilizando aproximadamente 1700 empleados. La mayoría con experiencia en elemento finito y dinámica de fluido computacional.

Ilustración 56: Logotipo de ANSYS

ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otro software para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además presta soporte a la industria.

ANSYS, Ins. Es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

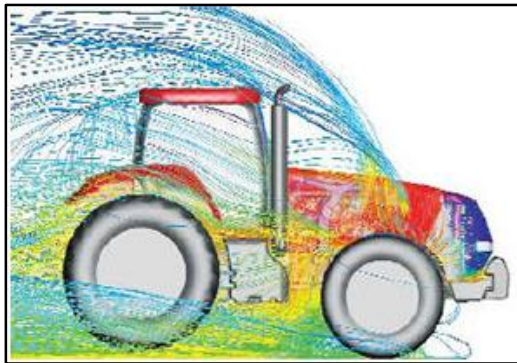
En 2008, el National Institute of Standards and Technology de Estados Unidos utilizó ANSYS para modelar los acontecimientos que llevaron al inicio del desplome del edificio World Trade Center 7 durante los atentados del 11 de septiembre de 2001.

ANSYS en un software que engloba diversos programas de simulación de entornos reales, eléctricos, magnetismo, mecánica de esfuerzos, simulación de flujos, etc.

Para el proyecto se utilizará el entorno de Ansys, para importar la geometría que proviene del diseño CAD, para más tarde utilizar el mallado (mesh) también del propio software para después, una vez mallado, utilizar el programa FLUENT para realizar la simulación. Todos estos pasos, serán expuestos de forma más detallada más adelante.

5.2 FLUENT

FLUENT es un software que contiene amplias capacidades de modelado físico



necesario para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, y las reacciones de las aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión a la combustión en un horno, de columnas de burbujas a las plataformas petroleras, desde el flujo sanguíneo a los semiconductores, fabricación y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Ilustración 57: Simulación en FLUENT

Hay modelos especiales que le dan al software la capacidad de modelar en el cilindro de combustión, aeroacústica, turbomaquinaria y sistemas multifásicos que han servido para ampliar su alcance.

Hoy en día, miles de empresas de todo el mundo se benefician de la utilización de FLUENT como parte integral de sus fases de diseño y optimización para el desarrollo del producto.

Las funciones definidas por el usuario permiten la implementación de nuevos modelos de usuario y la amplia personalización de los ya existentes. Las capacidades de la configuración de resolución interactivo, solución y post-procesamiento de FLUENT hacen que sea fácil hacer una pausa en el cálculo, analizar los resultados con post-procesamiento integrado, cambiar cualquier ajuste, y luego continuar con el cálculo en una sola aplicación. Los expedientes y datos se pueden leer en CFD-Post para un análisis más avanzado de post-procesamiento de las herramientas y la comparación de los diferentes casos.

La integración de FLUENT en Workbench proporciona a los usuarios con mejores conexiones bidireccionales y a todos los sistemas CAD más importantes, la modificación de la geometría y creación con tecnología ANSYS DesignModeler y avanzadas tecnologías de mallado en ANSYS mallado. La plataforma también permite que los datos y los resultados sean compartidos entre las aplicaciones mediante un sencillo arrastrar y dejar caer, por ejemplo, utilizar una solución de flujo de fluido en la definición de un límite de carga de una simulación de la mecánica estructural posterior.

La combinación de estos beneficios con la amplia gama de capacidades de modelado físico y los resultados rápidos y precisos que los software ANSYS tienen para ofrecer en uno de los paquetes de software más completos para el modelado, disponibles en el mundo de hoy.

El programa FLUENT lo utilizaremos para la simulación tanto del guardabarros como de los diferentes modelos de alerones. El proceso a seguir, será básicamente, realizar los programas CAD para modelar, a continuación usar ANSYS para importar la geometría y mallar, para finalizar simulando en FLUENT para después analizar los resultados.

5.3 PROCESO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se explicará paso a paso todo el proceso llevado a cabo para la simulación de un modelo de alerones y del guardabarros. El proceso sólo se explicará para un alerón ya que todas las variantes se resolverán de la misma forma. En cambio, los resultados de todos los modelos si se expondrán y comentarán.

Tras realizar los modelos CAD, hay que establecer las condiciones de entorno, lo que queremos conseguir, los puntos del circuito donde queremos que el sistema trabaje y maximizar los resultados.

El objetivo es conseguir un freno aerodinámico como anteriormente se expuso. Por lo tanto, hay que tener en cuenta, en que puntos del circuito se quiere obtener la máxima fuerza de frenada (**drag**).

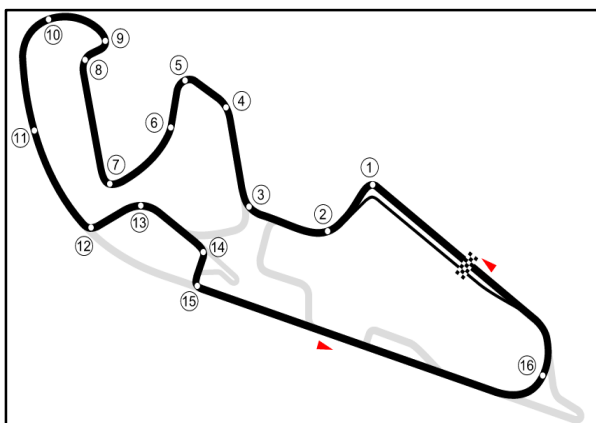


Ilustración 58: Curvas numeradas del circuito de Aragón

Para el desarrollo del sistema, tendremos en cuenta, que para conseguir la mayor fuerza aerodinámica posible, sólo la obtendremos en las frenadas después de una gran recta, por tanto, todos los datos de cálculo los realizaremos respecto al circuito donde se realizará la prueba, que es el circuito de Motorland de Aragón.

Como se puede apreciar en la imagen, el circuito posee dieciseis curvas. Analizando el circuito, el sistema de alerones funcionará de forma optima para las curvas 1,8,12 y 16.

La idea del sistema, es que el los alerones con geometría variable, se despliegan únicamente en estas curvas, y en las demás curvas y en las rectas, estos no actuen. Como se puede apreciar en la figura, en las curvas 1 y 16, se alcanzarán la máxima velocidad posible por nuestra motocicleta, como hasta la fecha de realización del presente proyecto, no se ha podido realizar test en circuito, la velocidad máxima que alcanzará la motocicleta será estimada, se establecerá de 140 km/h, (38,8 m/s). Para las rectas más cortas, la velocidad estimada será de 110 km/h (30,5 m/s).

Establecidas las velocidades, las simulaciones para la optimización del mejor alerón, las realizaremos con la velocidad máxima. Una vez, seleccionado el mejor alerón, realizaremos la simulación con ambas velocidades para calcular la mejora global en una vuelta.

Una vez establecidas las velocidades y las zonas del circuito, establecemos las condiciones ambientales y horarias de la prueba. La competición de Motostudent se realizará para el mes de octubre, por tanto, como se observa en el capítulo 3, las condiciones ambientales son, una temperatura media de 14,7 °C, una densidad del aire de $1,23 \frac{kg}{m^3}$ y una viscosidad dinámica de $1,78 \cdot 10^{-5} N \cdot s/m^2$. Además estableceremos una zona horaria, que será las horas centrales del día y un día soleado.

Condiciones Ambientales de la prueba	
Densidad del aire	$1,23 \frac{kg}{m^3}$
Viscosidad dinámica	$1,78 \cdot 10^{-5} N \cdot s/m^2$
Temperatura media	14,7 °C
Zona horaria	Medio día (12-16h)



La simulación de los alerones, se reduce a la simulación de un fluido alrededor de un cuerpo. El fluido en este caso particular es el aire, y el cuerpo los alerones. Por tanto, hay que establecer las características del fluido. A continuación, se describe y definirán los diferentes aspectos característicos de un flujo junto con la particularización para nuestro caso concreto.

5.3.1 Compresibilidad del flujo

En la mecánica de fluidos dada su complejidad de cálculo, siempre se busca la simplificación del problema. Una de estas simplificaciones es considerar el flujo incompresible. Cuando un flujo se mueve a velocidades comparables a la velocidad del sonido, las variaciones de densidad se hacen importantes y el flujo se denomina compresible. Dichos flujos son difíciles de obtener en líquidos, pues se necesitan presiones elevadas para conseguir velocidades sónicas. Sin embargo, en gases basta una relación 2:1 para causar flujos sónicos. Por tanto, el flujo compresible de gases es bastante habitual.

En la práctica, lo que sucede es que un flujo incompresible es dependiente de la presión y la temperatura, complicando sus cálculos enormemente. Es por ello que se busca la incompresibilidad como hipótesis. Para determinar en flujos gaseosos (es nuestro caso aire) si considerar dinámica de un fluido incompresible o compresible se utilizará como criterio que el número de Mach tenga un valor pequeño.

Antes de comprobar el valor del número de Mach, se explicará que es y en qué consiste. El número de Mach es un parámetro adimensional, medida que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido (343 m/s (a 20 °C de temperatura, con 50% de humedad y a nivel del mar)) en el medio en el que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$Ma = \frac{V}{a} \ll 1$$

Existe además otra ecuación, cuando no se conoce la velocidad exacta en el medio a estudiar:

$$Ma = \frac{v}{c}$$
$$\text{donde } c = \sqrt{kRT}$$
$$\text{donde } K = \frac{C_p}{C_v}$$

V= velocidad del fluido.

a= velocidad del sonido.

T= temperatura medida en Kelvin.

R= constante general de los gases.

C_p= Calor específico a presión constante.

C_v= Calor específico a volumen constante.

Sí el número de Mach es pequeño, las variaciones de densidad suelen ser pequeñas en todo el campo fluido. La ecuación de la energía queda desacoplada, y a efectos de la temperatura pueden ser omitidos. La ecuación de estado, por tanto, enuncia simplemente que la densidad es constante. Por ello, el análisis de los flujos incompresibles sólo precisa de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.

Para analizar que tipo de fluido tenemos, previamente hay que conocer los tipos de fluidos que existen:

- **Flujo incompresible:** Es cualquier fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición. Esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido pueden cambiar. El agua es un fluido casi incompresible, es

decir, la cantidad de volumen y la cantidad de masa permanecerán prácticamente iguales, aún bajo presión.

- **Flujo subsónico:** Los efectos de la densidad son importantes, pero no aparecen ondas de choque. (Es una onda de presión abrupta producida por un objeto que viaja más rápido que la velocidad del sonido en dicho medio, que a través de diversos fenómenos produce diferencias de presión extremas y aumento de la temperatura (si bien la temperatura de remanso permanece constante de acuerdo con los modelos más simplificados).

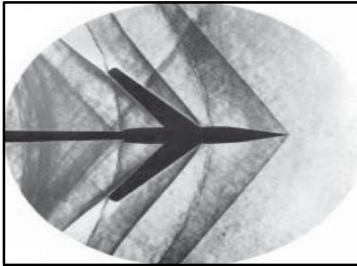


Ilustración 59: Flujo subsónico

La onda de presión se desplaza como una onda de frente por el medio. Una de sus características es que el aumento de presión en el medio se percibe como explosiones).

En un flujo subsónico, la velocidad de la corriente es inferior a la velocidad de propagación de las perturbaciones (velocidad del sonido). El fluido puede “transmitir información aguas arriba”. En el caso de un flujo alrededor de un perfil (nuestro caso), el fluido aguas arriba “conoce la existencia “del perfil, de modo que la adaptación a su geometría se produce bruscamente en forma de ondas de choque.

- **Flujo transónico:** Se le llama velocidad transónica al rango entre 980 y 1230 km/h. Un flujo transónico se producen cuando en el campo de flujo de un fluido compresible coexisten velocidades subsónicas y supersónicos dependiendo del perfil aerodinámico.

En un objeto que viaja todavía a menor velocidad que la del sonido, en el flujo alrededor localmente de un objeto, puede excederse la velocidad del sonido. La transición del flujo de aire, de flujo de subsónico a supersónico está asociado con una onda de choque que causa una alta resistencia al flujo que afecta a la distribución de la presión en el vehículo. EL carácter mixto del campo fluido dificulta predecir lo esperado sobre un perfil alar.

Durante mucho tiempo, por lo tanto, viajar a velocidades superiores a la del sonido fue un reto no resuelto de las aeronaves, para lo cual fue acuñado el término de barrera del sonido.

- **Flujo supersónico:** Un campo de flujo en donde el número de Mach sea, en cada punto, constantemente superior a la unidad será considerado como supersónico.

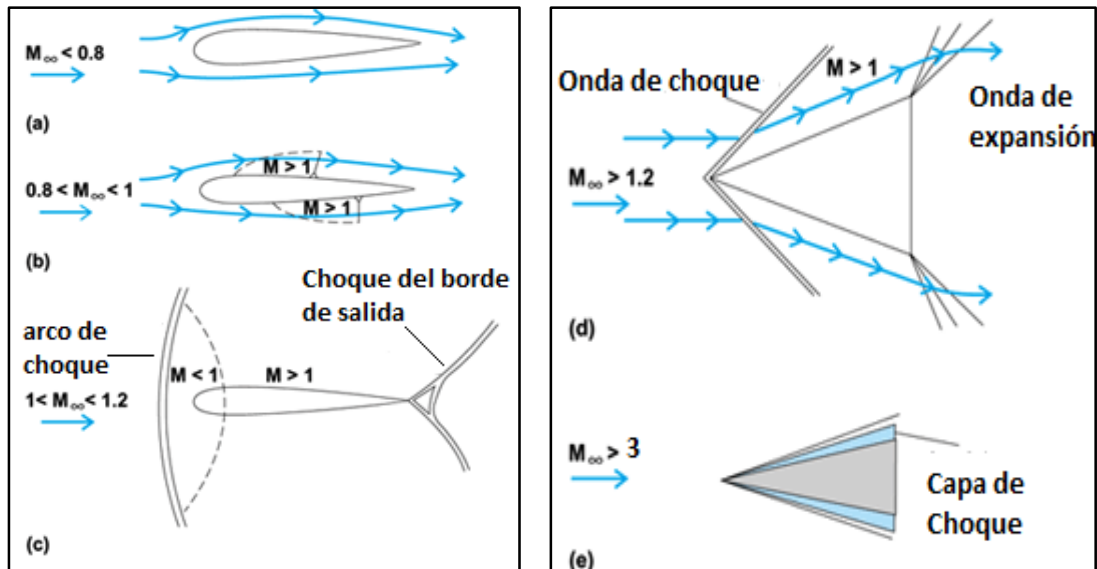
Puede que se presente una onda de choque en dos dimensiones, (choque oblicuo), y como se estudiará posteriormente, la corriente de flujo, posterior a la onda de choque puede continuar supersónica, a pesar de existir las correspondientes discontinuidades en las propiedades del mismo.

Aguas arriba de la onda de choque las líneas de corriente son paralelas y rectas. Aguas abajo de la onda de choque continúan siendo rectas y paralelas. A diferencia del flujo sónico, la corriente libre uniforme supersónica no se percata tan rápidamente de la presencia de la obstrucción y se genera una onda de choque. El campo de flujo es generalmente supersónico aguas arriba y abajo de la onda de choque oblicua, existiendo dramáticos cambios en físicos en las propiedades del campo de flujo.

- **Flujo hipersónico:** La temperatura, la presión y la densidad de un campo de flujo se incrementan a través de alguna onda de choque. En la medida en que el número de Mach se incrementa a valores muy altos, en esa misma medida los cambios en las propiedades serán más severos.

Para valores de $M > 5$ y con alguna onda de choque existirán, en el campo de flujo, un aumento de temperatura tal que el gas se disocia y reacciona químicamente. Por esta razón el campo de flujo con $M > 5$ es un caso muy especial en el cual se le denomina flujo hipersónico. Se ha establecido entonces que el valor de $M=5$ sea la frontera entre el flujo supersónico y flujo hipersónico.

Valores de Mach - Flujos	
$Ma < 0.3$	Flujo incompresible (a)
$0.3 < Ma < 0.8$	Flujo subsónico (b)
$0.8 < Ma < 1.2$	Flujo transónico (c)
$1.2 < Ma < 3.0$	Flujo supersónico (d)
$3.0 < Ma$	Flujo hipersónico (e)



5.3.2 Cálculo de los datos particulares para nuestro caso

A continuación vamos a calcular el número de Mach para nuestros casos particulares y así poder saber que tipo de flujo se tendrá.

$$Ma = \frac{V}{a} \ll 1$$

Donde la velocidad máxima será de 140 km/h y la velocidad mínima de 110 km/h.

La velocidad del sonido es de 1224 km/h en el aire.

$$Ma = \frac{140}{1224} = 0,1143$$

, se trata sin duda, de un flujo incompresible para el caso

de máxima velocidad, y por consiguiente, para el valor de velocidad mínima también será flujo incompresible.



5.3.3 Viscosidad del Flujo

Los problemas viscosos son aquellos en los cuales la fricción del fluido tiene efectos significativos en el movimiento de este. El número de Reynolds se puede utilizar para evaluar si el problema ha de ser resuelto mediante ecuaciones viscosas o no.

En este caso, el número de Reynolds quedaría definido como la relación entre las fuerzas viscosas y la inercia del propio fluido.

Números altos de Reynolds indican que las fuerzas inerciales son más significativas que las de fricción o viscosas. Es por ello que se puede despreciar la viscosidad al compararlo con las inercias del fluido, considerado un flujo no viscoso.

Sin embargo ciertos problemas, como aquellos que impliquen contornos sólidos, pueden necesitar el término viscoso para obtener un resultado fiel a la realidad. Esto es debido que la condición de no rozamiento da lugar a la teoría de la capa límite. Dentro de esta delgada capa límite tenemos una región viscosa de gran importancia, puesto que genera vórtices debido al rozamiento, la cual se desprecia en la teoría no viscosa.

Es por ello, que para calcular fuerzas netas sobre cuerpos, como es el caso del perfil aerodinámico a analizar, debemos utilizar ecuaciones para flujo viscoso.

La técnica de la capa límite y la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) se utilizan para calcular los efectos viscosos dentro de las paredes sólidas y “acoplar” éstos al movimiento exterior no viscoso. Este acoplamiento es tanto más efectivo cuanto mayor sea el número de Reynolds basado en el cuerpo.

- **Concepto de capa límite:**

En los movimientos a altos números de Reynolds (basado en la longitud característica del movimiento), los efectos viscosos son despreciables. Los efectos de conducción de calor también lo son si el producto del Reynolds por el Prandtl es grande. Esto lleva implícito el despreciar los términos de mayor orden en las derivadas de la velocidad y de la temperatura, de modo que no pueden imponerse todas las condiciones de contorno. Como consecuencia de ello, las condiciones de contorno en el movimiento de un fluido ideal en presencia de una pared se reducen a decir que la velocidad es tangente a la pared (si no hay paso de masa a través de dicha pared).



Sin embargo, dentro de la aproximación de un fluido como medio continuo, sabemos que la velocidad de un fluido en contacto con una pared es igual a la velocidad de la pared y que la temperatura del fluido debe coincidir con la de la pared (si a través de dicha pared no hay paso de masa ni reacción química o evaporación en su superficie).

Para poder imponer todas las condiciones de contorno es necesario que los términos viscosos y de conducción de calor sean tan importantes como los convectivos. Sin embargo, si se utiliza la longitud característica L del movimiento, el número de Reynolds es tan alto que estos términos serían despreciables.

Por lo tanto, es evidente que cerca de las paredes (donde se deben imponer las condiciones de contorno) la velocidad (y temperatura) sufre variaciones del orden de ella misma en distancias δ . El orden de magnitud de “ δ ” se determina de la condición de que los términos viscosos sean tan importantes como los convectivos, que son los más importantes cuando el número de Reynolds es alto.

El primero en indicar la existencia de una zona en la que los efectos viscosos son importantes, a pesar de que el número de Reynolds del movimiento sea alto, fue Prandtl en 1904. La idea de Prandtl de una región donde los efectos viscosos son importantes puso en claro multitud de fenómenos que hasta entonces no habían obtenido explicación satisfactoria. En particular explicó el porqué la teoría de fluidos ideales (altos números de Reynolds) proporciona buenos resultados cuando se quiere determinar la sustentación o fuerza normal a la dirección de la corriente incidente sobre un obstáculo, y sin embargo esta teoría ideal es incapaz de proporcionar la resistencia (o componente de la fuerza en la dirección de la corriente incidente).

También explico el desprendimiento de la capa límite en cuerpos romos (en general con gradientes adversos de presión), y como consecuencia de ello la existencia de una resistencia de forma (que no depende de la viscosidad, pero es causada por ella).

En cuerpos fuselados la capa límite no se desprende más que en la parte final del cuerpo, formando una estela muy delgada. En este caso la resistencia es prácticamente toda ella debida al rozamiento (viscosidad). Sin embargo, en un cuerpo romo, la capa límite se desprende generando una estela amplia, donde la presión toma valores próximos a la estática en el infinito, mientras que en el borde de ataque la presión es del orden de la de remanso, generándose una fuerza de resistencia del orden de la diferencia de presiones por el área frontal. Esta fuerza, aunque originada por el desprendimiento de la capa límite, que a su vez tiene su origen en la viscosidad, no depende de dicha viscosidad si el número de Reynolds es muy alto.

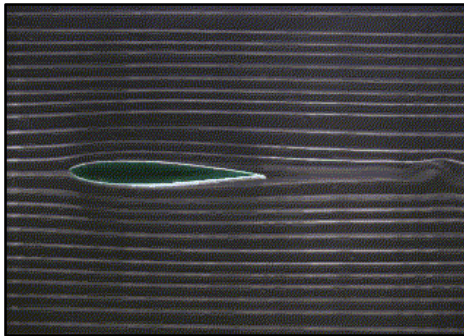


Ilustración 60: Cuerpos fuselados

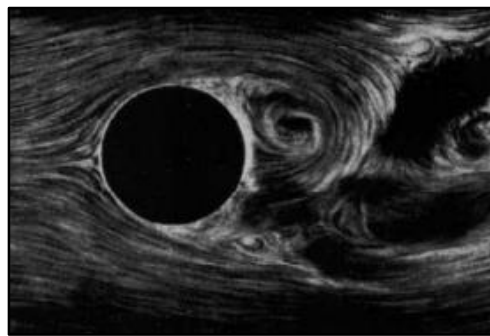
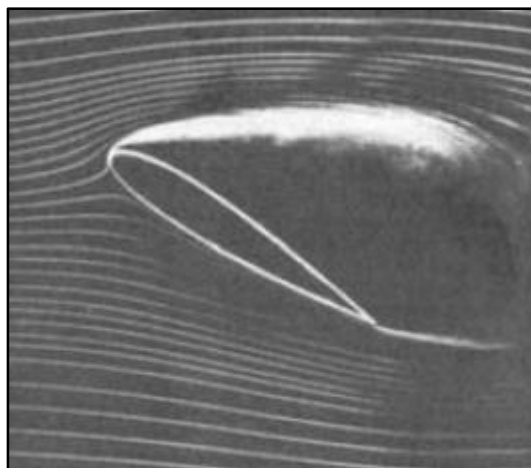


Ilustración 61: Cuerpos romos

En el caso de un cuerpo fuselado, en el que la corriente no está lo suficientemente “alineada” con su geometría, puede desprenderse la corriente como en el caso de un cuerpo romo. Este es el caso de un perfil cuando el ángulo de ataque es elevado.

En el movimiento de los fluidos alrededor de cuerpos o en presencia de paredes, si el número de Reynolds es grande, hay una región exterior donde los efectos viscosos y de conducción de calor son despreciables. Las ecuaciones se reducen a las de Euler, a las que no se le pueden imponer todas las condiciones de contorno. La solución de Euler proporciona una velocidad tangente a la pared y que varía a lo largo de ella, que denominaremos corriente exterior. Esta denominación se debe a que es la corriente que “se ve” en el exterior de la capa límite.

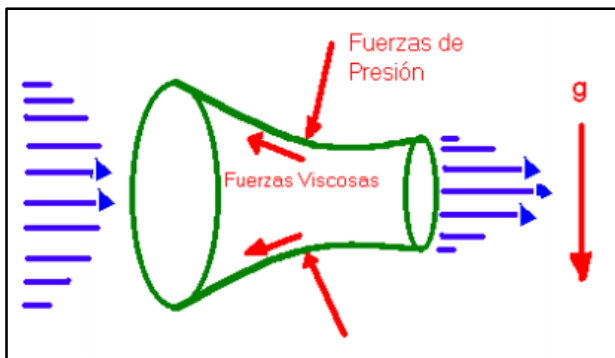


**Ilustración 62: Elevados ángulos de ataque crean prontos desprendimientos de la
capa límite.**

Dado que el espesor de la capa límite es pequeño comparado con la dimensión longitudinal, “L”, característica del movimiento, consideraremos el eje de coordenadas x a lo largo de la superficie del cuerpo y el eje y perpendicular y transversal a la capa.

Dado que salvo algunas excepciones, el radio de curvatura de la superficie es grande frente al espesor de la capa límite, consideraremos los ejes x - y como un sistema de coordenadas cartesianas.

- **CAPA LÍMITE**



En el proceso del movimiento de un fluido aparecen las siguientes fuerzas sobre el volumen de control del sistema. Las fuerzas son, fuerzas de presión, gravitatoria y viscosa, que se explicarán a continuación.

Ilustración 63: Gráfico de fuerzas de un fluido

- **Fuerzas de presión:** Normales a la superficie de control debidas a la diferencia de presión.

- **Fuerza gravitatoria:** Por efecto del campo gravitatorio sobre la masa del fluido.

- **Fuerza viscosa:** Debida a los efectos viscosos producidos durante el movimiento del fluido en las proximidades de la superficie de control. Las acciones de las fuerzas viscosas se producen en las proximidades de la zona de contacto sólido-líquido. Dentro de la capa límite.

La fricción del fluido viscoso sobre la superficie del sólido provoca una tensión de cizalladura proporcional al gradiente vertical de velocidades. La distribución de velocidades va desde cero en el contacto con la superficie hasta la velocidad máxima para las zonas alejadas de la superficie. La región comprendida entre ambos estados se denomina capa límite superficial.

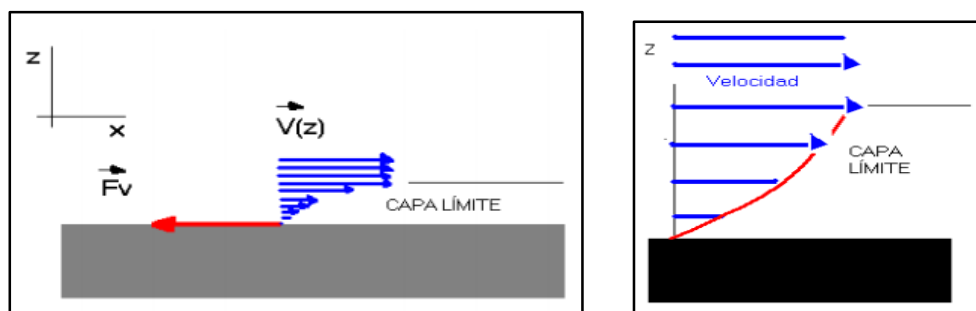


Ilustración 64: Capa límite

La capa límite es la región donde se efectúa la transición entre las velocidades del flujo libre y aquellas de la pared, como se puede observar en la siguiente imagen. En la figura (figura X), se puede ver en gris, un cuerpo de forma elíptica el cual está dispuesto en dirección al flujo. Las líneas de corriente que se observan del flujo son de un flujo incompresible idealizado, ya que la capa límite no rompe al final del objeto. Se puede observar a arriba a la derecha un perfil de velocidades. En A', la velocidad es la del fluido en sí y según descendemos hasta llegar abajo, donde la velocidad es cero.

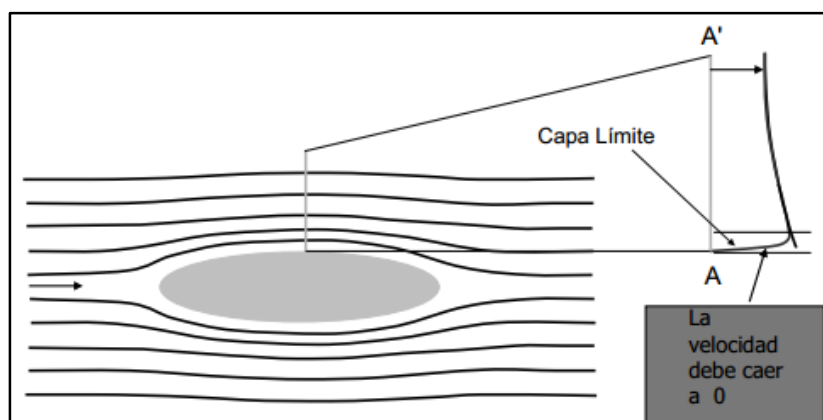


Ilustración 65: Gráfico de la capa límite alrededor de un perfil

Para poder entender apropiadamente la teoría de la capa límite es necesario explicar el teorema de Kutta-Jukowski para la sustentación alrededor de cilindros, y la paradoja de D' Alembert.

Para un flujo dado alrededor de un cilindro el cual rota sobre su eje longitudinal, experimentalmente se observa que hay una fuerza vertical y hacia abajo, o sustentación negativa, denominado efecto Magnus-Robins, que es proporcional a la velocidad de la corriente uniforme y a la intensidad del torbellino. Del esquema de las líneas de corriente, se deduce que la velocidad en la parte superior del cilindro es

menor que en la parte inferior, y según la ecuación de Bernuilli anteriormente expuesta en este proyecto, la presión es más alta en la parte superior, lo que explica que exista esta fuerza. Por supuesto, no hay fuerzas viscosas, ya que la teoría sobre la que nos apoyamos es no viscosa.

En esta circunstancias podemos definir la resistencia D sobre el cilindro como la integral sobre la superficie del cilindro de la componente horizontal de las fuerzas de presión:

$$D = - \int_0^{2\pi} (P_s - P_\infty) \cos\beta b a d\beta$$

Donde b es la anchura del cilindro perpendicular al papel, $P_s - P_\infty$ es la presión manométrica en la superficie, y a es el radio de una sección del cilindro. La integral de $\cos\beta$ multiplicado por cualquier potencia de $\sin\beta$ extendida a toda la circunferencia 2π es nula. Por tanto, obtenemos un resultado inesperado:

$$D_{\text{cilindro con circunferencia}} = 0$$

Este es un caso particular de la paradoja de D' Alembert publicada en 1752 que afirma que, según la teoría no viscosa, cualquier cuerpo de forma arbitraria inmerso en una corriente uniforme no tiene resistencia. D' Alembert indicaba que su enunciado no concordaba con lo que ocurría en los flujos de fluidos reales. Esta desafortunada paradoja dio pie a una reacción exagerada y las teorías no viscosas fueron rechazadas. Fue Pradtl, en 1904, quien mostró cual era el efecto, de suma importancia para el flujo, de la delgada capa viscosa en la parte superior del cuerpo.

5.3.4 Ecuaciones de la capa límite bidimensional compresible y estacionaria

Las ecuaciones de la capa límite bidimensional estacionaria de un fluido compresible, pueden escribirse en la forma

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} &= 0, \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{dp_e}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \\ \rho u \frac{\partial h_0}{\partial x} + \rho v \frac{\partial h_0}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial y} \right).\end{aligned}$$

La primera ecuación es la ecuación de la continuidad de la que se deduce que

$$v \sim u \frac{\delta}{\ell} \ll u,$$

Por ser $\delta \ll L$, la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección del eje y se reduce a decir que la presión no cambia con y , de modo que adquiere su valor en el exterior de la misma. Por esa razón se ha sustituido $\partial p / \partial x = dp_e / dx$, siendo p_e la presión en el exterior de la capa y conocida de la solución exterior de Euler.

En la tercera ecuación, de la energía h_0 es la entalpía de remanso

$$h_0 = h + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \approx h + \frac{1}{2} u^2.$$

Como la presión es constante a través de la capa límite, la densidad se determina mediante la ecuación de estado $\rho = p_e / R_g T$ y la entalpía mediante la relación $h = c_p T$ en el caso de los gases.

Para que el término de conducción sea comparable al convectivo en la tercera ecuación de la energía, es necesario que

$$\frac{\delta T}{\ell} \sim \frac{1}{\sqrt{RePr}},$$

siendo δT el espesor de la capa donde los efectos de conducción de calor son importantes. Esta capa se denomina capa límite térmica. El número de Prandtl $Pr = \mu c_p / k$ es de orden unidad en el caso de los gases, de modo que el espesor de ambas zonas, viscosa y térmica, es comparable. Puede no ocurrir así en el caso de líquidos, dando lugar a una capa térmica mucho más gruesa que la viscosa si $Pr \gg 1$ (pero $Pr Re \gg 1$), o mucho más delgada si $Pr \ll 1$. Para los líquidos, la disipación viscosa es despreciable.

Las condiciones de contorno para integrar las ecuaciones anteriores son

$$\begin{aligned} \text{En } y = 0 : u = 0; v = v_s; h_0 = h_p \left(\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \right), \\ \text{En } y \rightarrow \infty : u = u_e; h_0 = h_{0e}, \\ \text{En } x = 0 : u = u_i(y); h_0 = h_{0i}(y). \end{aligned}$$

En las condiciones anteriores se ha supuesto una velocidad de succión o soplado, v_s , distinta de cero en la pared. En la condición de contorno para la temperatura en la pared se han supuesto dos posibilidades: la temperatura del gas coincide con la temperatura de la pared conocida ($h_p = c_p T_p$), o bien la pared está aislada térmicamente ($\partial T / \partial y = 0$).

Las ecuaciones para el caso incompresible toman la forma simplificada

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{dp_e}{\rho dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \end{aligned}$$

don $Pr = \mu c / k$ es el número de Prandtl. Las condiciones de contorno son

$$\begin{aligned} \text{En } y = 0 : u = 0; v = v_s; T = T_p \left(\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \right), \\ \text{En } y \rightarrow \infty : u = u_e; T = T_e, \\ \text{En } x = 0 : u = u_i(y); T = T_i(y). \end{aligned}$$

5.3.5 Desprendimiento de la capa límite

Como se ha indicado anteriormente, existe la posibilidad de que el fluido “frenado” por la capa límite pueda ser transportado a la corriente exterior y arrastrado por ella. Cuando este ocurre se dice que la capa límite se ha desprendido una estela como la de la figuras. Cuando existe una región con presiones crecientes a lo largo de la pared ($dp/dx > 0$ ó gradiente adverso de presiones) las partículas fluidas frenadas en la capa límite no pueden, en general, penetrar muy lejos en la zona de gradiente adverso de presión a causa de su baja energía cinética, y la capa límite es deflectada separándose de la pared. El punto de separación corresponde a esfuerzo nulo en la pared.

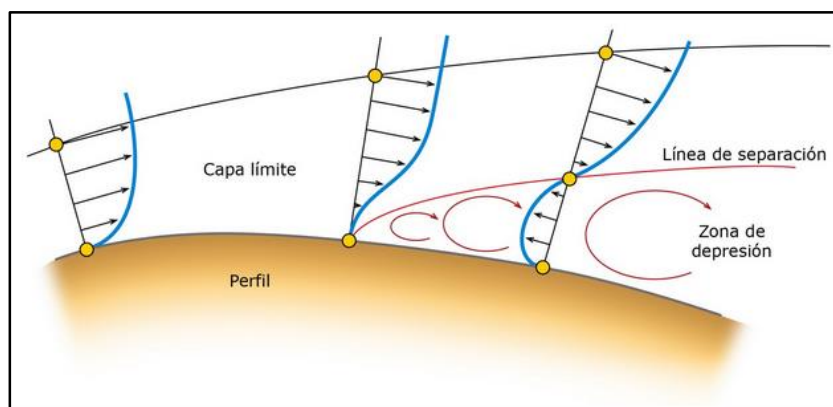


Ilustración 66: Desprendimiento de capa límite

5.3.6 Estacionariedad del flujo

Desde el punto de vista más analítico un flujo se considera estacionario cuando todos los términos con derivadas temporales que describen un flujo son nulos. En otras palabras, el estado estacionario de un flujo se da cuando las propiedades del fluido en un punto no cambian a lo largo del tiempo. En caso contrario, el flujo será transitorio.

Que un flujo sea transitorio o estacionario, puede depender del sistema de referencia elegido. Un flujo laminar alrededor de una esfera es estacionario en el



sistema de referencia solidario con la esfera, es decir, que también es estacionario respecto esta. En el caso de que el sistema de referencia se establezca respecto a un flujo de fondo, el flujo analizado sería transitorio.

Los flujos turbulentos son transitorios por definición. Sin embargo, en la línea de toda la fluidomecánica, será necesario realizar ciertas consideraciones para poder simplificar el cálculo y acercar el resultado a la realidad. Por lo tanto, un flujo transitorio puede considerarse estadísticamente estacionario.

Matemáticamente hablando, un proceso estadísticamente estacionario es un proceso estocástico o aleatorio cuya distribución de probabilidad compuesta permanece constante cuando se varía en el tiempo o en el espacio. Derivado de esto, la media y la varianza también permanecen invariables, por lo que se considera un caso estacionario válido.

Como se sugiere anteriormente, los flujos estacionarios generalmente son más manejables que un flujo transitorio equivalente. Las ecuaciones que rigen un flujo estacionario presentan una dimensión menos (tiempo) que las que rigen el mismo problema sin la ventaja de la estacionariedad del campo fluido.

En nuestro caso, tenemos una motocicleta que recorre una larga recta y los alerones actuarán durante un periodo de tiempo, pero el fluido y sus condiciones son constantes. Estos sólo actúan en esta situación, por tanto, estableceremos que existe un flujo estacionario, ya que los alerones siempre actuarán en las mismas condiciones.

5.4 SIMULACIÓN ANSYS FLUENT

Una vez que tenemos todos los datos teóricos, todos los datos técnicos, los modelos CAD y las condiciones de contorno, podemos comenzar con la simulación a través de métodos computacionales. Existen varios programas de fluidos, pero nosotros utilizaremos Ansys Workbench, que integra entre otros programas, el Fluid dynamics. Este programa es de los más utilizados para simulación de alerones y por ejemplo equipos como Red Bull lo utilizan en la fórmula uno para el desarrollo aerodinámico de sus monoplazas. A continuación, se expondrán todos los pasos a seguir para la simulación de los alerones, y con posterioridad los resultados de la simulación y las conclusiones de los datos obtenidos. En este capítulo se expondrán todos los pasos a seguir para la simulación de un modelo de guardabarros, ya que todas las variantes que se simulen se harán de igual manera. En cambio, los valores

de los resultados obtenidos y la conclusión de todos ellos sí se incluirá en este capítulo.

Una vez que tenemos todas las condiciones de contorno, se puede realizar el análisis de los alerones y guardabarros. La memoria se estructurará en tres partes. La primera se simulará el guardabarros sin alerones. Después se simulará los guardabarros con alerones fijos para terminar con la simulación de los alerones con geometría variable.

Por su carácter repetitivo, únicamente se explicará una vez todos los pasos a seguir en el programa de un guardabarros con alerones, con los demás casos únicamente se expondrán y comentarán los resultados.

5.4.1 Ansys Fluent, la simulación

- Primer paso

Una vez que tenemos el guardabarros con los alerones, abrimos el programa Ansys Workbench, seleccionamos el módulo Fluid Flow (Fluent) y pulsamos sobre este, en el árbol que aparece en la izquierda de la pantalla como se puede observar en la presente imagen.

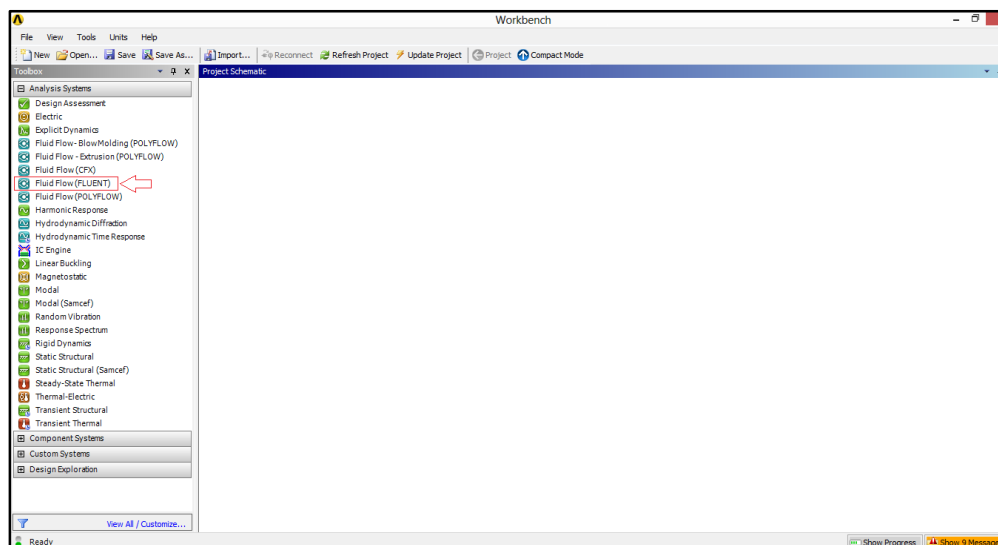
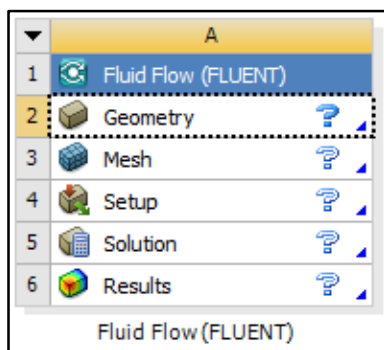


Ilustración 67: Pantalla del programa ANSYS FLUENT

Una vez hemos realizado esto, en el cuadro de la derecha, nos aparecerá un cuadro en el que aparecen varias casillas, que iremos cumpliendo desde la primera hasta la última para obtener los resultados. Según las completemos, el signo de interrogación cambiará por un tic verde, o por una cruz roja si hemos realizado un paso mal. El cuadro lo podemos ver en la siguiente imagen.



Lo primero que aparece, Fluid Flow (Fluent), simplemente es el nombre del módulo que hemos seleccionado. El segundo que aparece, Geometry, es el primer paso que realizaremos, en este apartado, importaremos la geometría, crearemos el volumen de control, etc, que más tarde comentaremos. El tercer punto es Mesh, aquí es donde realizaremos el mallado de nuestro objeto, y que se explicará con todo detalle.

**Ilustración 68: Menu de ANSYS
FLUENT**

El cuarto apartado, es Setup, es el programa FLuent en sí, donde introduciremos todos los parámetros y se realizarán los cálculos. El quinto apartado, es dónde se observarán las soluciones tras los cálculos. El sexto apartado es Result, es el programa CFX, donde se obtienen los videos, imágenes etc.

- Segundo Paso Geometry

Pulsaremos en Geometry, que se puede ver en la anterior imagen, y nos abrirá una nueva pantalla, donde importaremos el archivo CAD donde modelamos los guardabarros y los alerones, previamente guardados como archivo .igs.

En este módulo, al principio, nos aparece un cuadro con las unidades que se utilizan en el proyecto, (figura X).

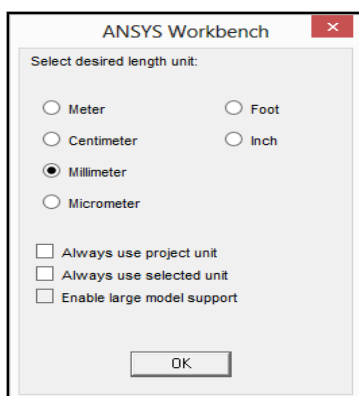


Ilustración 69: Menu de unidades del SI

Una vez seleccionado la casilla de milimeter, pulsaremos en OK. A continuación nos aparecerá una pantalla, en la parte superior izquierda, aparece una casilla con el título de File, pulsaremos en esa casilla, se desplegará un menu, donde pulsaremos en Import External Geometry File, que se abrirá otra ventana donde seleccionaremos el archivo CAD que queremos utilizar. Esto se puede ver con mejor detalle en la imagen.

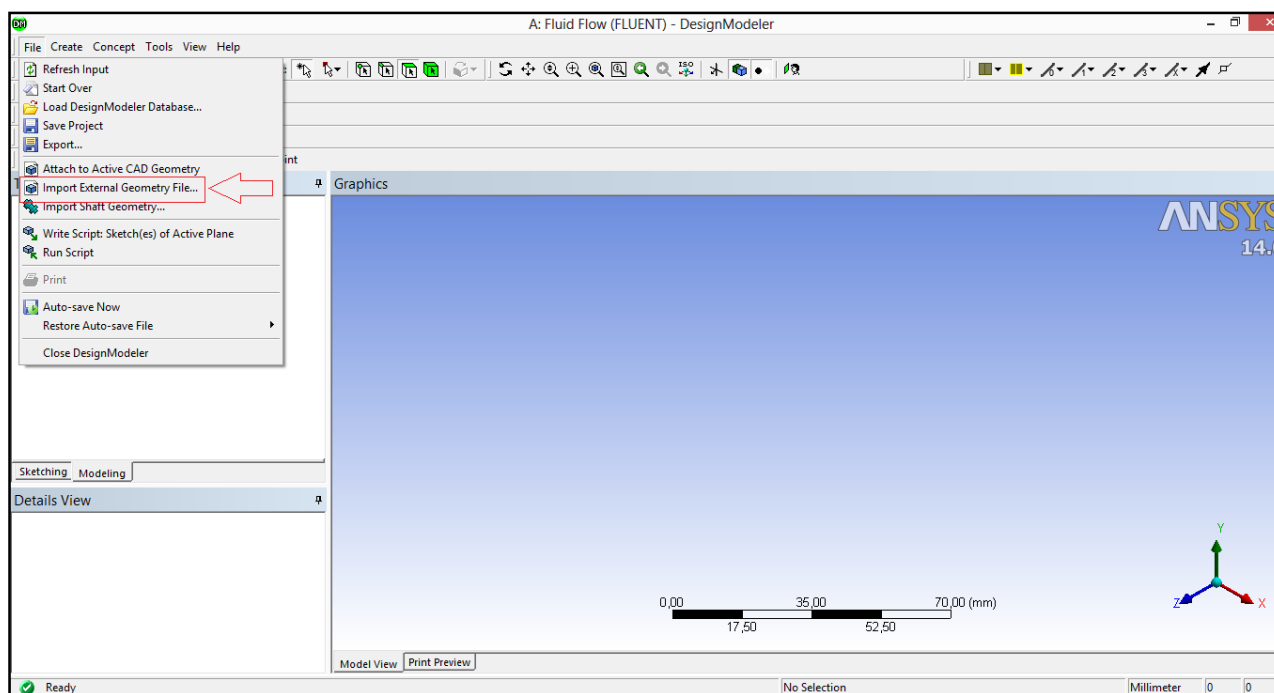


Ilustración 70: Pantalla menu Tools

Después, una vez importada la geometría, crearemos el volumen de control. El volumen de control, es el espacio donde se introducen las condiciones de control y se realizan los cálculos. Crearemos una caja de grandes dimensiones donde dejaremos el guardabarros en su interior. Todo lo que existe dentro de la caja es el aire con sus

condiciones que circulará alrededor de nuestro guardabarros. Para crear el volumen de control realizaremos los siguientes pasos:

En el menu superior de la pantalla, pulsamos en Tools, después en Freeze.

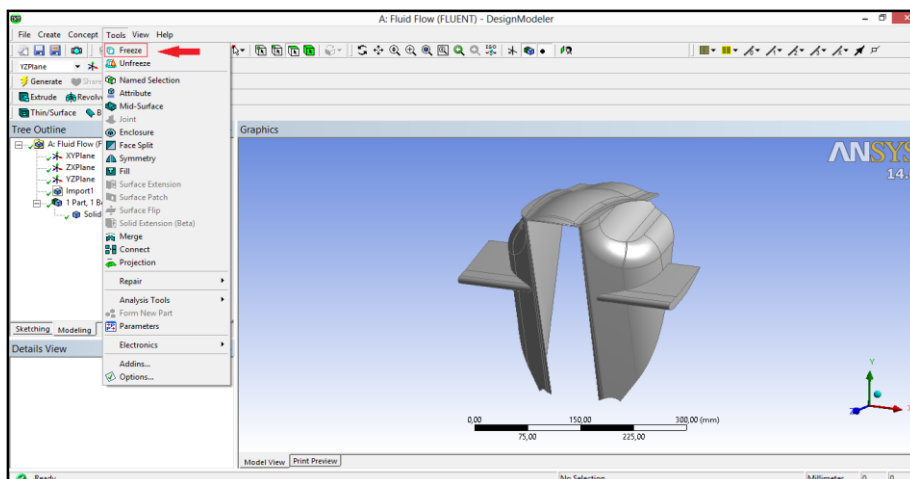


Ilustración 71: Pantalla menu Tools Freeze

En este mismo menu, pulsaremos ahora en Enclosure. Aquí, crearemos el volumen de control, por tanto, una vez pulsado, a la izquierda de la pantalla abajo, aparecerá un menu, que se puede ver en la siguiente imagen.

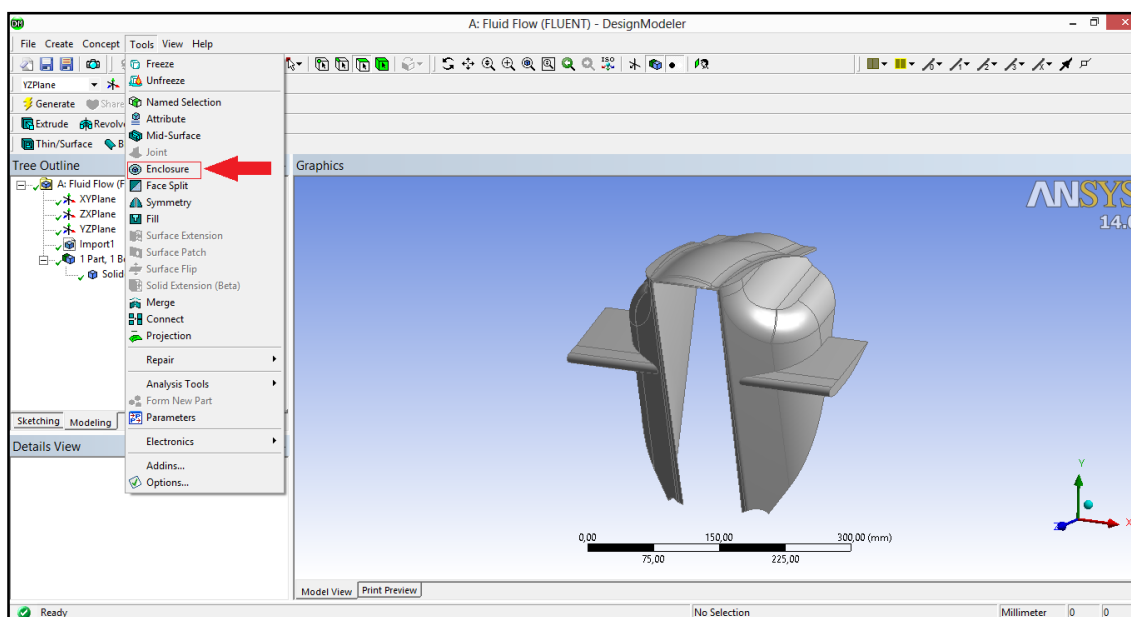


Ilustración 72: Pantalla menu Tools Enclosure

En la primera casilla que aparece, *Sharpe*, se puede seleccionar el tipo de volumen de control que se desee. En este caso se seleccionará *Box*, ya que se creará un rectángulo de grandes dimensiones.


Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Non-Uniform
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion +X value (>0)	30 mm
<input type="checkbox"/> FD2, Cushion +Y value (>0)	30 mm
<input type="checkbox"/> FD3, Cushion +Z value (>0)	30 mm
<input type="checkbox"/> FD4, Cushion -X value (>0)	30 mm
<input type="checkbox"/> FD5, Cushion -Y value (>0)	30 mm
<input type="checkbox"/> FD6, Cushion -Z value (>0)	30 mm

Ilustración 73: Menu Enclosure

La segunda casilla, *Number of Planes*, se utilizará para crear planos de simetría.

En este caso, crearemos un plano de simetría ya que, para reducir tiempos de simulación, sólo simularemos la mitad del guardabarros, y por tanto, la mitad de los alerones, así que, hay que tener en cuenta que los datos que se obtendrán hay que multiplicarlos por dos. Se pulsará en la casilla de la derecha y seleccionaremos el plano XZ.

En la tercera casilla, *Cushion*, se puede seleccionar, la longitud de nuestro rectángulo. Por ejes manualmente como se observa en la anterior imagen, si seleccionamos en *Non-Uniform*. En cambio, si seleccionamos *Uniform*, se elegirá de forma automática para todos los ejes el tamaño que se quiera. En este caso, seleccionaremos de modo manual las dimensiones.

Después de haber creado la simetría, de haber creado las dimensiones de la caja, pulsaremos en el icono generate,  **Generate**. Todo los datos seleccionados para esta simulación se pueden ver en la siguiente figura.

Una vez realizado todos los pasos hasta el momento, y pulsamos generate, podemos observar en la imagen anterior como el árbol de la izquierda, en todas sus ramas existe un tic en verde.

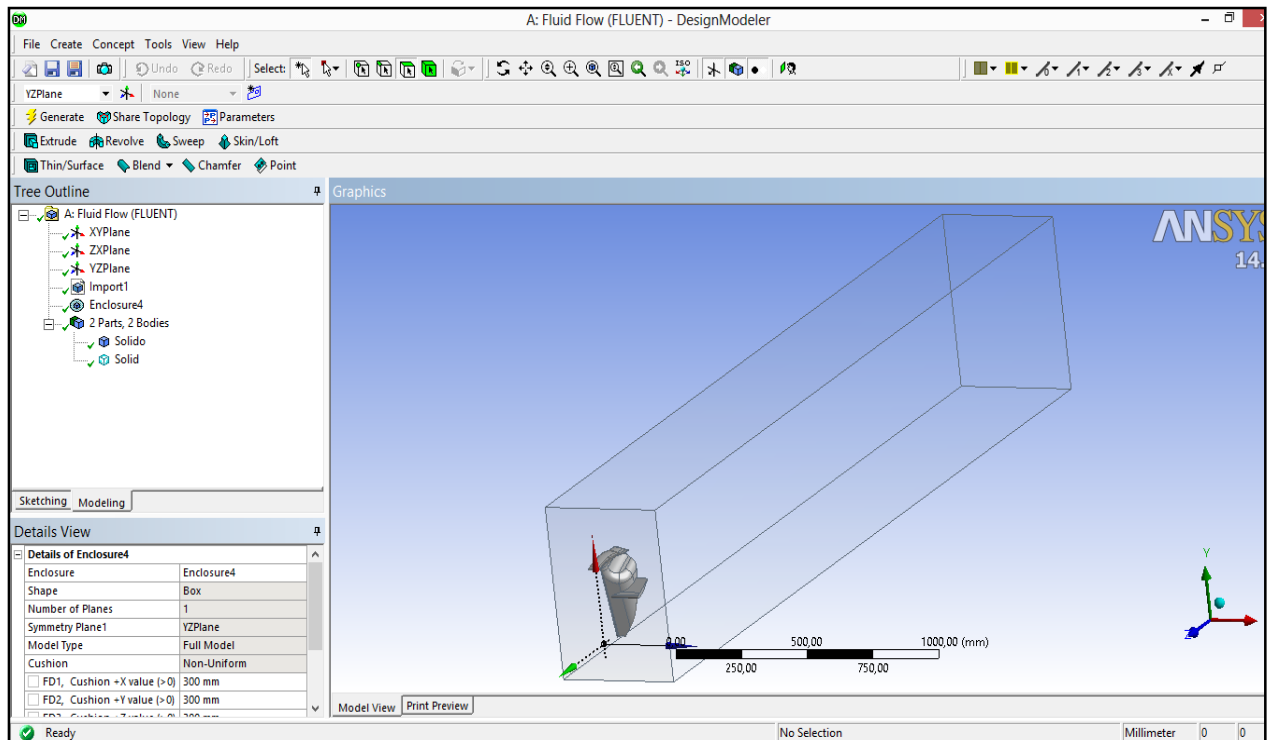


Ilustración 74: Menu Boolean

En el menú principal, pulsamos en create, a continuación en boolean. Una vez pulsada esta, en el menú que aparece en la parte inferior izquierda de la pantalla, tenemos que especificar en target , seleccionamos el volumen de control, y en bodie, seleccionamos el guardabarros al completo. Acabado esto, salimos del menu de geometry.

Cuarto paso Mesh

En este módulo, crearemos la malla para después realizar la simulación. La malla se utiliza para situar todos aquellos puntos en los que se quiere realizar los cálculos, por tanto, la realización de una buena malla, de buena calidad, dará como consecuencia datos cercanos a la realidad. A continuación se detallará todo aquello que se debe de tener en cuenta en la realización de la malla.

- **Consideraciones generales para el mallado de un Modelo**

A) Elección de la Malla:

- Consideraciones importantes a tener en cuenta:

1. Tiempo necesario para crear la malla.
2. Costes computacionales.
3. El efecto de la difusión numérica.

- En las estructuras simples se utilizan mallas estructuradas o estructuradas por bloques (cuadrangular, hexagonal, etc...)

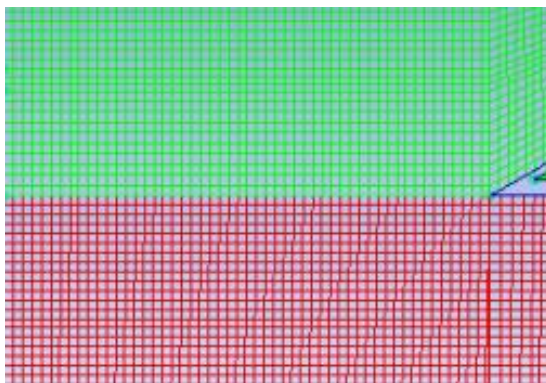


Ilustración 75: Malla cuadrangular

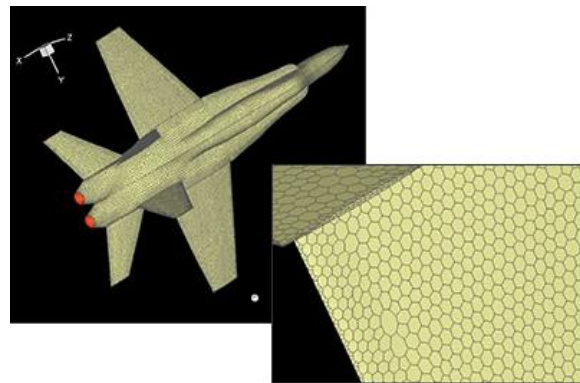


Ilustración 76: Malla hexagonal

Pero las Mallas muy complejas, sí se hacen como las simples, requieren mucho tiempo y son más caras, por lo tanto, se emplean estructuras triangulares y tetraédricas.

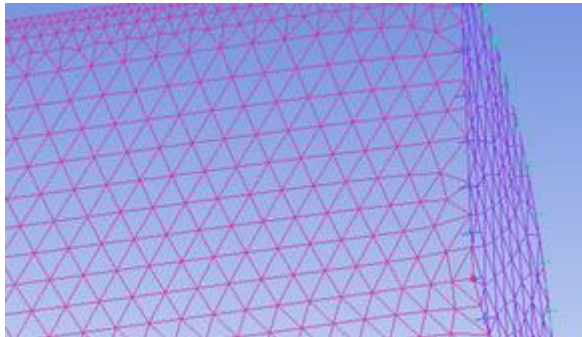


Ilustración 77: Malla triangular

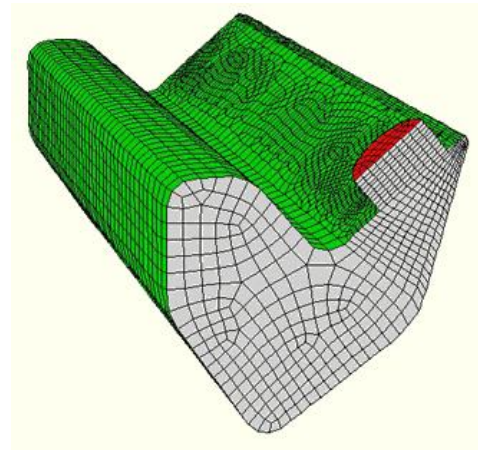


Ilustración 78: Malla tetraédrica

- Cuando las geometrías son complejas o el rango de longitudes de escalas de flujos es grande, un mallado triangular y tetraédrico suele ser el más apropiado ya que requiere un menor número de celdas que un mallado cuadrangular y hexaédrico.

Esto es debido a que las primeras permiten que las celdas sean agrupadas en regiones seleccionadas del dominio del fluido, mientras que las mallas estructuradas pueden llegar a requerir un gran número de celdas en zonas donde no se necesitan.

No obstante, para geometrías de un grado de complejidad medio, las mallas no estructuradas de tipo cuadrangular y hexagonal ofrecen muchas de las ventajas de las mallas triangulares y tetraédricas.

En otros aspectos, las mallas cuadrangulares y hexaédricas ofrecen también ventajas respecto a las triangulares y tetraédricas. Las primeras permiten mayores relaciones de aspecto.

Una relación de aspecto elevada en mallas triangulares y tetraédricas implica necesariamente mayores esquinamientos de las celdas, lo que debe evitarse siempre que sea posible, dada la repercusión negativa en la convergencia y exactitud del problema.

En cuanto a la difusión numérica (Ho llamada difusión ficticia B dado que no se trata de una difusión física real) se trata de una de las fuentes de error dominantes en situaciones multidimensionales.

Todos los algoritmos numéricos para la resolución de flujos de fluidos presentan el problema de la difusión numérica por los errores de truncamiento derivados de la consideración de las ecuaciones del flujo en forma discreta.

La difusión numérica está muy relacionada con la resolución de la malla. Así, malla refinadas proporcionan menor difusión numérica. También se minimizará el problema cuando el flujo está alineado con la malla, lo que hace más apropiadas las mallas cuadrangulares y hexagonales al ser imposible usar una malla triangular y tetraédrica.

B) Importancia de la calidad de una malla

- La calidad de la malla juega un papel importantísimo en la estabilidad y exactitud de los cálculos numéricos. Algunas de las propiedades asociadas con la calidad de una malla son, por ejemplo, la densidad y distribución de los nodos B, suavidad B, esquinamiento B, relación de aspecto, etc.

Como al mallar un elemento se define de forma discreta un recinto que en realidad es continuo, el grado de exactitud con el cuál se resuelven las zonas más complejas del flujo (Como zonas en las que se producen ondas de choque, zonas de mezcla, fuentes o sumideros, etc). Dependerá de la densidad y distribución de los nodos de la malla en dichas zonas.

Una resolución pobre de la malla en dichas en estas zonas críticas del flujo puede alterar dramáticamente sus características. Por ejemplo, en flujos laminares, a la hora de mallar, la zona adyacente a las paredes para modelar la capa límite, es particularmente importante que se cumpla la siguiente relación:

$$Yp \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\gamma x}} \leq 1$$

Yp = Distancia de la pared al centro de la celda adyacente

U_{∞} = Velocidad del flujo libre

γ = Viscosidad cinemática del fluido

X = Distancia desde el punto donde comienza la capa límite hasta la pared



La resolución de la malla en flujos turbulentos, es también muy importante debido a la interacción entre el flujo principal y la turbulencia.

Los resultados numéricos tienden a ser más sensibles a la dependencia de las características del mallado que los flujos laminares. En estos casos, la resolución de la malla requerida en las zonas adyacentes a las paredes depende del modelo de pared usado.

Desafortunadamente, en los casos tridimensionales complejos, es muy difícil predecir la localización de las zonas críticas en los que tienen lugar cambios importantes en el flujo, con el fin de definir una malla lo suficientemente refinada en dichas zonas.

En el caso tridimensional estamos además condicionados por aspectos como la CPU y la memoria del ordenador usado para realizar la simulación. Naturalmente, conseguimos mayor exactitud con mallas bien construidas y refinadas, pero a costa de mayores tiempos de cálculo y post-processing de la solución.

Otro factor importante es la suavidad de la malla. Esta propiedad está relacionada con el cambio de volumen entre celdas adyacente. Cambio rápidos conllevan a un gran error de truncamiento definido como las diferencias entre las derivadas parciales entre las ecuaciones de flujo y sus aproximaciones discretas.

También es preciso tener en cuenta la forma de las celdas. Al respecto se habla de esquinamiento y relación de aspecto.

C) Esquinamiento de una célula

Se define como la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda cuadrilátera del mismo volumen. Celdas muy esquinadas pueden reducir la exactitud y desestabilizan la solución.

Las mallas cuadriláteras óptimas son aquellas con ángulos en los vértices próximos a 90° , mientras que las mallas triangulares deberían tener preferiblemente ángulos próximos a 60° y todos sus ángulos menores de 90° .

D) Relación de aspecto

Es una medida de estiramiento de la celda. Para flujos no isotrópicos el uso de relaciones de aspecto grande puede proporcionar resultados exactos con un

menos número de celdas. No obstante es conveniente no usar relaciones de aspecto superior a la relación 5:1.

Por último, los efectos de la resolución, suavidad y forma de la malla sobre la exactitud y la estabilidad del proceso de solución son altamente dependientes de las características del flujo objeto de la simulación.

Las celdas muy esquinadas pueden tolerarse en zona donde el flujo no sufre cambios, mientras que en zonas de altos gradientes, pueden ser muy perjudiciales. Dado que, normalmente, no podemos determinar a priori, donde se producen los mayores gradientes. Es aconsejable mallar el modelo completo con una malla de alta calidad.

Bajo los criterios anteriormente mencionados, realizaremos la malla, y a continuación se expone todos aquellos pasos que se harán para el mallado de este caso.

1. Una vez cargado el módulo Mesh, en el árbol que aparece a la izquierda, seleccionamos Mesh, pulsamos el botón derecho, y en el menu que se despliega, pulsamos generate mesh.

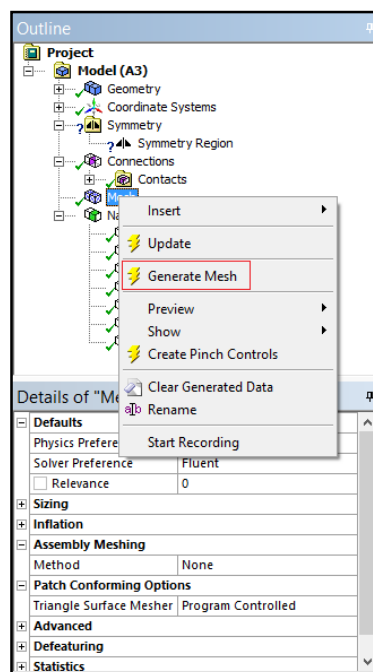


Ilustración 79: Menu Mesh

Pulsado este, se crea una malla automática como se aprecia en la siguiente figura.

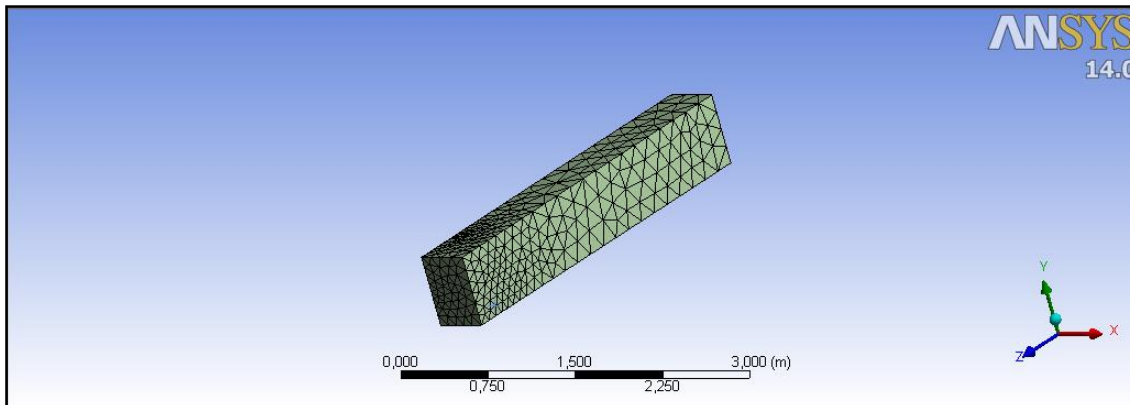


Ilustración 80: Modelo mallado

De esta forma, ya estaría creada la malla, pero esta malla es muy pobre, y haremos la malla de forma manual.

2. Antes de crear la malla de forma manual, nombraremos las diferentes partes de nuestro objeto para diferenciar unas partes de otra, para poder mejorar la malla de forma más fácil y para poder ver mejor los resultados.

Lo primero que se realizará, es seleccionar con el ratón las partes del objeto que se quiere nombrar. Cuando pulsamos en estas, estas cambian de color y adquieren un color verde. Una vez seleccionadas todas las partes, seleccionamos botón derecho del ratón. Se desplegará un menú, y seleccionaremos *Create Named Selection*, se pondrá el nombre que se quiera y se pulsa *OK*.

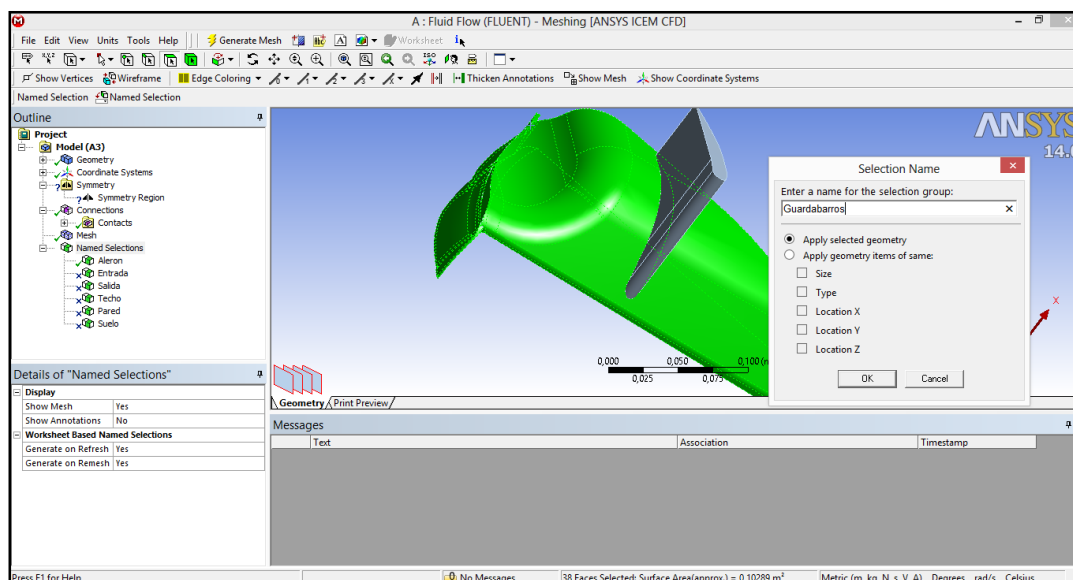


Ilustración 81: Menu de Name Selection

- 3- Una vez todas las partes nombradas, comenzaremos el mallado manual, el primer paso, es ordenar la malla de la caja exterior, (el rectángulo). Para realizar esto, seleccionamos en el menu superior, *Mesh Control*, a continuación pulsamos en *Mapped Face Meshing*.

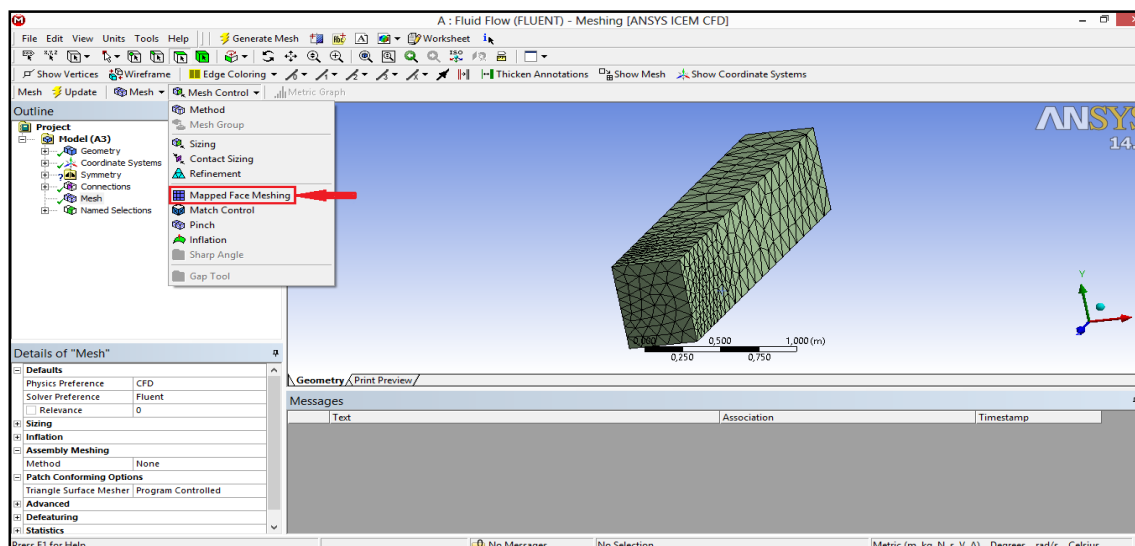
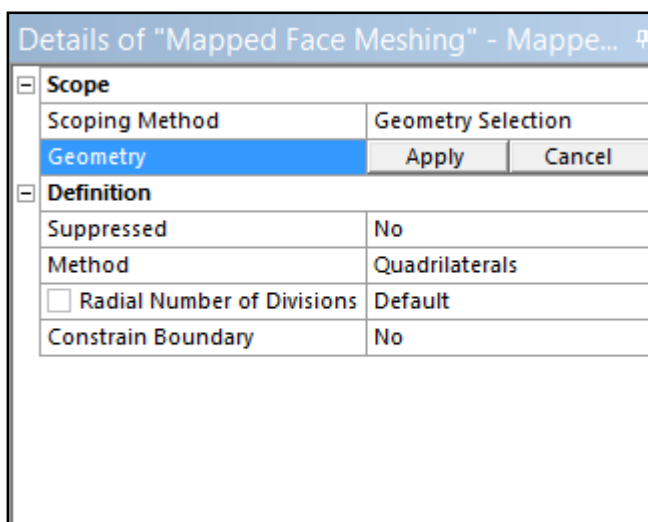


Ilustración 82: Menu para hacer el mallado manual

Una vez pulsado este, aparece a continuación un menu despegable en la parte inferior izquierda, como se aprecia en la siguiente imagen.



En la presente figura, podemos observar diferentes casillas. En *Geometry*, seleccionamos las partes que se requieren. En este caso, seleccionamos todas las partes de la caja, entrada, salida, techo, suelo y paredes. Una vez seleccionadas, se pulsa en *Apply*. En *Method*, se selecciona el tipo de malla, cuadrangular, triangular, etc..

Ilustración 83: Menu de Mapped Face Meshing

En nuestro proyecto seleccionaremos *Quadrilaterals* (cuadrangular). Los demás parámetros de las diferentes casillas se dejan los parámetros que hay predefinidos.

En la siguiente figura, se puede observar como queda la malla después del crear el mallado. Hay que añadir, que después de crear el Mapped, hay que pulsar en Generate. A los guardabarros y alerones, no le aplicaremos esto, ya que las geometrías son demasiado complejas, y por tanto, la malla daría error.

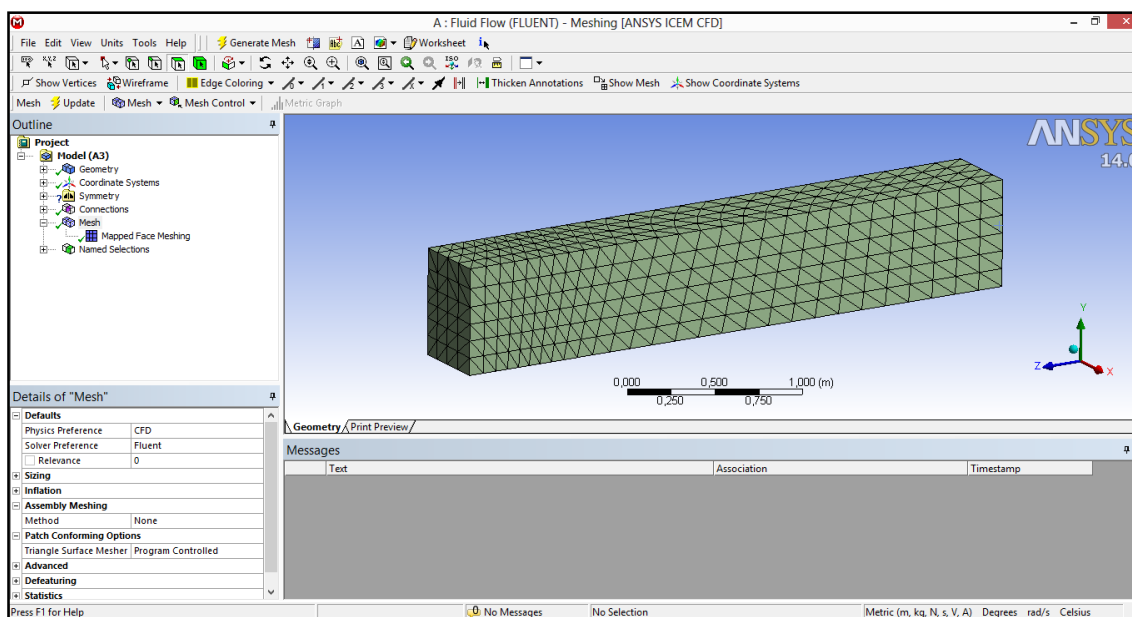


Ilustración 84: Mallado final sin ajustar

- 4- Ordenada la malla, seleccionamos el número de divisiones que se quiera en cada línea de los objetos. Esta opción del mallado, se realiza de forma sencilla sobre superficies fáciles con formas geométricas sencillas. Se realizaran estas divisiones únicamente en la caja del volumen de control, no sobre el guardabarros, pero sí sobre los alerones. Se realizará esto ya que queremos una malla más detallada y lo más geométrica posible.

Los pasos a seguir son: En el menu superior, pulsamos *Mesh Control*, en el menu que se despliega, pulsamos en *Size*.

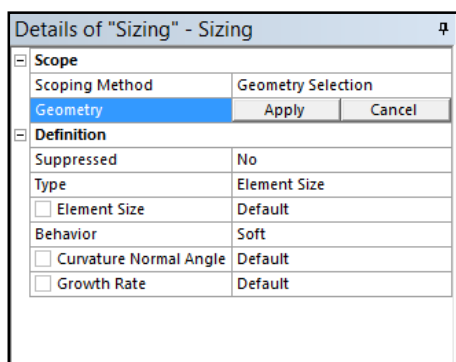



Ilustración 85: Menu Sizing

Realizado esto, en la parte inferior izquierda, se despliega un menu nuevo como el que se observa en la siguiente figura.

En la primera casilla, seleccionamos *Scoping Method*. Predefinido aparece *Geometry Selection*, esto quiere decir, que con este modo seleccionamos manualmente las superficies a tratar. Esta opción no la cambiaremos. En nuestro caso, queremos seleccionar únicamente aristas. Para realizar esto, debemos seleccionar en el menu superior de la pantalla en el icono de arista, . Pulsado este, seleccionamos las aristas de la caja, seleccionamos las aristas de igual tamaño y pulsamos en *Apply*.

A continuación, en la casilla *Type*, cambiamos *Element Size* por *Number of divisions*.

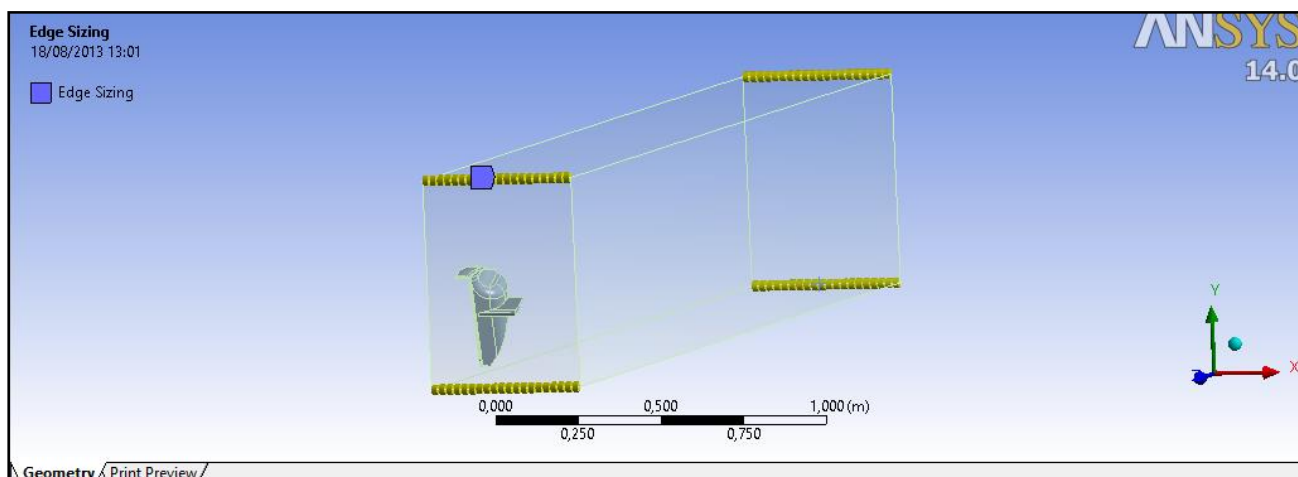


Ilustración 86: Edge Sizing

Seleccionamos esto para poder crear las divisiones. Hecho esto, aparecerá una casilla nueva, *Number of Divisions*, seleccionaremos 20. Para un mejor mallado, cambiaremos en la casilla *Behavior soft*, por *Hard*. Acabado, pulsaremos en *Generate*.

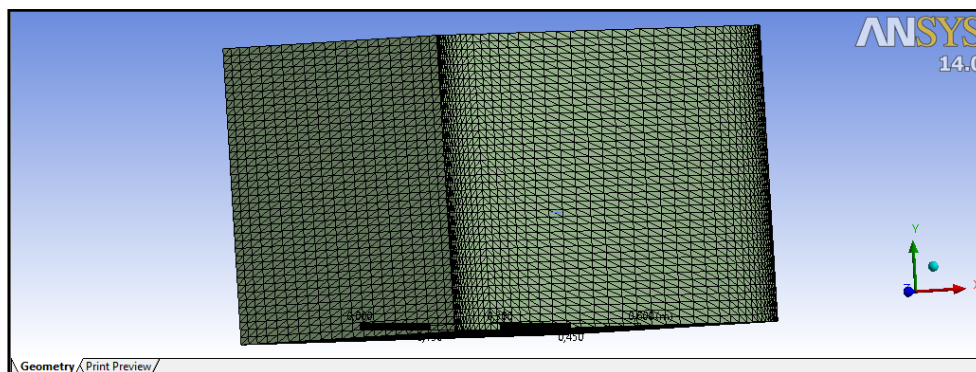


Ilustración 87: Mallado final

En la anterior imagen, se puede ver el resultado de la malla tras lo explicado. También realizaremos un *Size*, en los alerones. En los alerones realizar esto es más complicado, hay que gastar especial cuidado a la hora de seleccionar el número de divisiones, ya que realizar una malla excesivamente compleja obligará a largos tiempos de simulación y datos con una excesiva precisión que no nos serán de gran utilidad.

Finalizado todo lo anterior, pulsamos de nuevo en generate en el mallador y salimos del modo mallado. En el menu principal de Ansys Workbench pulsaremos en mesh segundo botón del ratón y pulsamos en Update. Acabado esto, salvamos el proyecto y abrimos el programa Fluent.

Cuarto paso Fluent

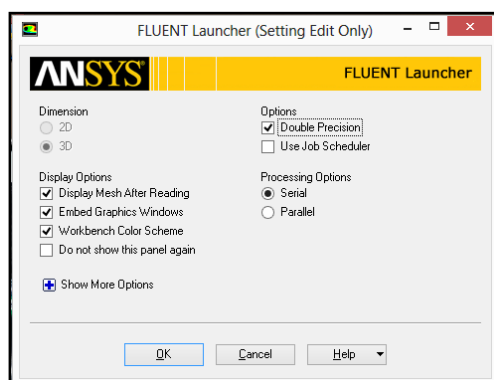


Ilustración 88: FLUENT Launcher

Acabada la malla, arrancamos el programa de Ansys Fluent. En la siguiente figura podemos observar el menu de inicio, donde seleccionaremos *3D, Double Precision, Serial* y las demás opciones preseleccionadas las dejamos como estan. Para ordenadores de mayor potencia se puede elegir parallel y seleccionamos el numero como gigas de memoria RAM tenga el ordenador y mejoraremos la velocidad de calculo de programa. Una vez finalizado esto, seleccionamos en *Ok*.

Iniciado el programa, aparece un menu a la izquierda con varios apartados, que iremos completando uno por uno hasta comenzar con el calculo. Antes de comenzar con el menu de la izquierda, en el menu que aparece en el centro de la pantalla, seleccionamos los valores que estan como predefinidos, ya que

consideraremos como flujo estacionario para una simplificación de los datos. En la siguiente figura se puede observar ambos paneles anteriormente mencionados.

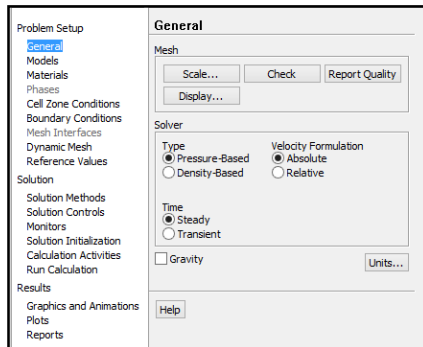


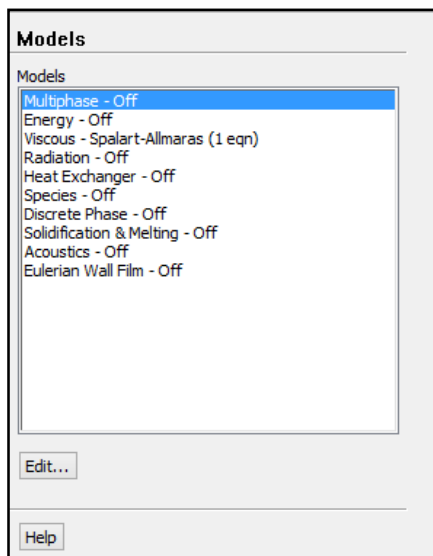
Ilustración 89: Parámetros FLUENT

En la imagen se puede apreciar los diferentes parámetros. Es aconsejable pulsar sobre *Check* para realizar una verificación de si *Fluent* ha reconocido bien la malla importada. Si queremos realizar una simulación con una escala menor para reducir los tiempos de cálculo, se puede pulsar en *Scale* y elegimos la escala que deseemos.

Los demás parámetros y los que están seleccionados de forma automática por el programa, no los cambiaremos, ya que en *Type*, utilizaremos *Pressure-based*, que se refiere a que basa la solución resolviendo una ecuación de presión corregida que es obtenida manipulando las ecuaciones de continuidad y de conservación de momentos. Se trata de la solución adecuada para flujos incompresibles, frente a la *Density-Based*, que obtiene la distribución de densidad (la cual no se considera constante) de la ecuación de continuidad. Sería la adecuada para flujos compresibles los cuales no permiten considerar la densidad constante. Ya que las coordenadas de velocidad serán absolutas y el espacio de trabajo plano (planar) seleccionaremos en *Velocity Formulation* el valor de *Absolute*. En *Time*, nos aseguraremos que este seleccionado *Steady*, ya que nuestro caso es estacionario. Por tanto, como todos los valores que necesitamos, ya están seleccionados por defecto, no cambiaremos nada.

En el árbol de menú de la izquierda, podemos ver tres grandes divisiones, *Problem setup*, donde se establecen las condiciones de contorno, que detallaremos a continuación. La segunda parte es *Solution Methods*, donde se establecerán los parámetros que queremos analizar, y cómo se realiza este cálculo. En la tercera sección, *Results*, es donde se pueden obtener los gráficos detallados de los resultados de los análisis.

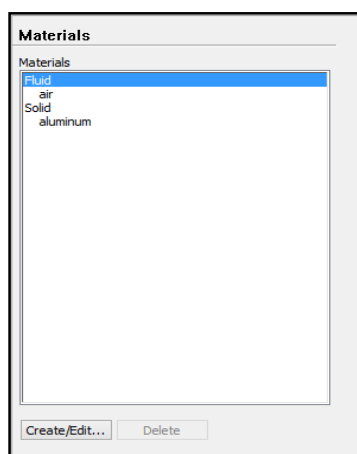
Para la simulación, comenzaremos por el primer punto, *Problem Setup*, en el árbol de la izquierda pulsaremos en *Models*. Nos aparecerá el menú que se puede observar en la siguiente imagen.



Elegiremos entre todos los modelos de simulación, únicamente en fluido viscoso, ya que nuestro fluido es el aire y por tanto existe efectos viscosos. En el desplegable, seleccionaremos en *Spalart- Allmaras*, que se asemeja a un fluido turbulento que para nuestro caso se aproximará más a la realidad y por que estamos en un caso relativamente sencillo, con un número de Match inferior a 0,3, y por tanto, obtendremos unos datos bastantes fiables.

Ilustración 90: Models FLUENT

Si se quiere realizar, un estudio con menor tiempo de simulación, en laminar, que sería el fluido ideal que se requiere, pero en la realidad siempre existe turbulencia. Los demás parámetros que aparecen en el menu dejamos los valores que están predefinidos.



En *Materials*, tenemos que seleccionar tanto el fluido, como el material de nuestro guardabarros. Por tanto, en *Fluid*, seleccionaremos en nuestro caso particular el aire. En *Solid*, aparece por defecto, aluminium, pero en nuestro caso, el guardabarros es de carbono, al darle a editar el material, en la base de datos no aparece el carbono, por tanto, tenemos que crear un material nuevo, con las propiedades del carbono. Una vez realizad esto, pulsas *Ok*.

Ilustración 91: Materials FLUENT

El siguiente apartado que debemos configurar, es el apartado de Boundary conditions. Este apartado es de gran importancia, ya que es clave para una buena simulación. En este campo, tenemos que ir seleccionando, uno a uno, las diferentes partes que establecimos en el mallado y adjudicarles a cada una de ella sus condiciones de contorno. Por tanto, si en el mallado no se nombra bien las partes, en

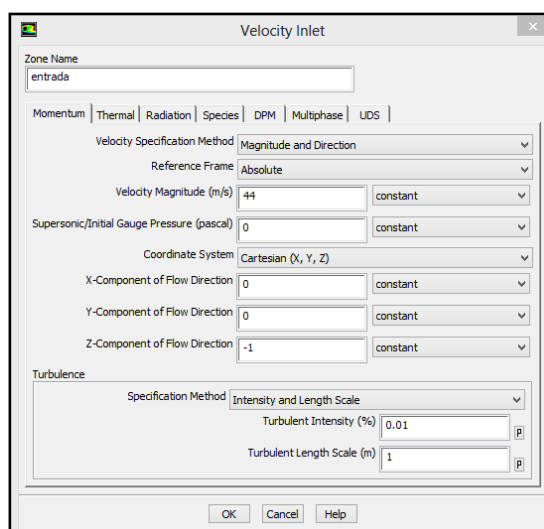
esta sección no se puede asignar bien las condiciones de contorno y por tanto la simulación no se podrá realizar. Por tanto, en la siguiente tabla, podemos observar las condiciones para cada sección y después explicadas cada una de ellas.

Partes nombradas en el mallado	Descripción	Condición de contorno
Entrada	Entrada del volumen de control	Velocity-inlet
Salida	Salida del volumen de control	Outflow
Guardabarros	Guardabarros	Wall
Alerones	Alerones	Wall
Paredes	Paredes del volumen de control	Wall
Fluido	Fluid, que en este caso es el aire	Fluid.

Velocity-inlet:

En la entrada de nuestro volumen de control, estableceremos la condición de contorno de Velocity-inlet, que permite definir el vector de velocidad a la entrada, es el más adecuado para flujos incompresibles. Requiere introducir la velocidad y especificar la turbulencia del campo del fluido. Cuando en el menú seleccionemos entrada, y velocity inlet, aparecerá una pantalla emergente donde tendremos que especificar la velocidad en metros por segundos y dar la dirección y sentido vectorialmente.

Para especificar la turbulencia, basándonos en las recomendaciones de Ansys y emulando los sistemas de reducción de turbulencia de los túneles de viento (rejillas, filtros), estableceremos una intensidad baja de turbulencia (0,01%). Suponiendo un espesor máximo de capa límite de 50mm, una medida adecuada es el cuarenta por ciento del espesor. Además en la pantalla emergente, nos aparecerá una casilla Specification Method seleccionaremos Intensity and Length Scale donde introduciremos el valor de turbulencia anteriormente mencionado. Todo esto se puede observar en la siguiente imagen.

**Ilustración 92: Velocidad Inlet**

Outflow:

En la salida se selecciona outflow (flujo saliente), ya que se utiliza para casos donde no se conozcan las características del flujo a la salida antes de selecciona el problema. Por otro lado, es necesario que la salida se encuentre en un punto donde el flujo este completamente desarrollado (lo que se puede garantizar debido a las grandes dimensiones de la malla). Esto es debido a que dado que se asumen gradientes nulos para todos los parámetros excepto la presión.

Wall

Seleccionamos tanto en el sólido como en las paredes del volumen de control que no sean la salida y la entrada la condición tipo Wall ya que la consideraremos como un muro, superficie por donde circule el fluido únicamente, por tanto, no hay que asignar parámetro alguno.

Una vez asignadas todas las condiciones de contorno, se pasa al siguiente paso en el árbol del menú de la izquierda, *Reference Values*, en este apartado, tenemos que asignar los valores que Fluent asignará como referencia para la realización de los cálculos. El valor de referencia que utilizaremos es el de entrada, ya que es el que tiene los parámetros de la velocidad y esto se asignará en el menú que aparece, en casilla de *Compute from*, los valores que aparecen se dejan todos como están excepto la longitud característica de nuestro modelo que la introduciremos manualmente.

Continuando por el árbol de la izquierda, pulsaremos a continuación finalizado lo anterior en *Solution Methods*, donde seleccionaremos las opciones por defecto,

dado que para este caso, de relativa sencillez, son suficientes las que aparecen. Únicamente cambiaremos la discretización del momento y la viscosidad turbulenta, que emplearemos un método de segundo orden para obtener resultados más precisos. Por tanto, seleccionaremos en *Modified Turbulent Viscosity*, la casilla de *Second Order Upwind*. Seleccionar este es necesario para obtener los valores precisos de arrastre, (drag), además es conveniente para flujos no alineados con la malla. Lo anterior expuesto se puede observar en la siguiente imagen.

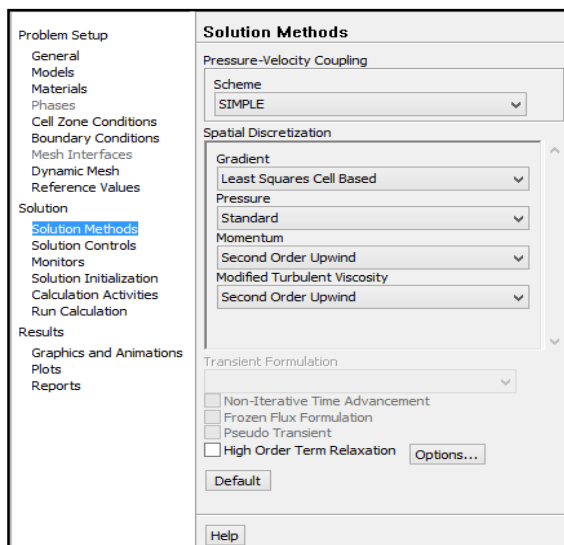


Ilustración 93: Solution Methods

Continuando por el árbol del menú de la izquierda, nos encontramos con Solution Controls, donde seleccionaremos el método basado en presión, (*pressure-based solver*), que utiliza el método iterativo de relajación para resolver las ecuaciones.

Esto implica que las ecuaciones gobernantes tendrán asociados factores de relajación. Por defecto, *Fluent*, propone valores que funcionan para la mayoría de los casos. En el caso de que la solución no llegue a converger, será cuando necesitemos cambiar los parámetros de forma manual. Por tanto, si alrededor de 1600 iteraciones, el programa no llega a la convergencia, se reducen los factores de relajación. En *Momentum*, cambiamos a 0,2, en *Modified Turbulent Viscosity* a 0,5 y en *Turbulent Viscosity* a 0,5 con respecto a los valores predefinidos. Todo esto se puede observar en la siguiente imagen.

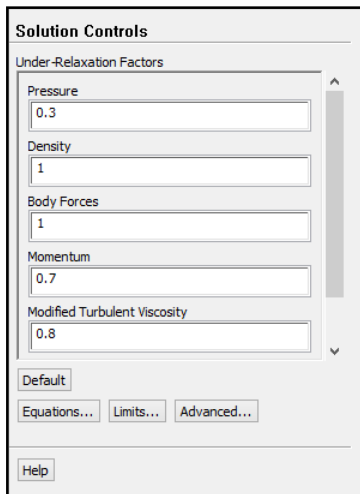


Ilustración 94: Cambio manual de los parámetros en FLUENT

Continuando por el árbol del menú de la izquierda el siguiente apartado que nos encontramos es *Monitors*, en este campo, configuraremos los monitores para controlar la convergencia y observar los residuos que se explicará más adelante. Activaremos además el *Lift* (sustentación) y *Drag* (arrastre) para observar analizar su progresión con mayor precisión teniendo especial cuidado al seleccionar el vector donde queremos realmente analizar estos parámetros.

Más adelante en el árbol del menú, encontramos otra casilla titulada *Solution Initialization*, donde simplemente iniciaremos las iteraciones con los parámetros y valores de la entrada para iniciar la simulación con los valores concretos del aire y de la velocidad configurada con anterioridad.

Finalmente en el árbol del menú, encontramos *Run Calculation*, donde seleccionaremos únicamente el número de iteraciones que queremos que realice el programa, aunque puede converger antes de las iteraciones máximas que le asignemos.



CAPITULO 6. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

6.1 Introducción

Una vez analizada toda la parte de aerodinámica, de diseño y simulación, en este capítulo se analizarán los resultados post-simulación. El planteamiento de la simulación se va a llevar a cabo en dos direcciones para realizar un análisis y unas buenas conclusiones de este proyecto. El primero de ellos será realizar el análisis de unos alerones que nos proporcionen ayuda a la frenada pero estos serán estáticos, es decir, siempre están dispuestos en el guardabarros, por tanto, deben conseguir un equilibrio entre apoyo en la rueda delantera y a frenada, ya que más apoyo en el tren delantero permite realizar una frenada más fuerte antes de que deslice dentro de unos valores.

La segunda dirección es el diseño y modelado de unos alerones con geometría variable que son realmente en lo que se centra este proyecto, que en recta estén ocultos y en frenada se desplieguen trabajando al máximo rendimiento. Los modelos para el diseño y la funcionalidad de estos, se asemejan bastante a los frenos de un avión o a los frenos aerodinámicos de la Nascar como se explicó con más detalle en la introducción de este proyecto. Dentro de esta dirección encontramos diferentes modelos, que se explicarán a continuación, que serán explicados sus diseños y posteriormente comparados sus resultados y finalmente se realizará una conclusión final con las ventajas obtenidas, y la eficiencia de este sistema con respecto a unos alerones de geometría fija. Además de todo esto, de los alerones que sean seleccionados para fabricarlos, se realizará la simulación a diferentes velocidades para ver como varía su contribución a la frenada.

Antes de comenzar con los diferentes modelos, en el siguiente cuadro se exponen a modo de resumen las condiciones de contorno bajo las que se van a llevar a cabo las simulaciones de este proyecto.

Velocidad	44 m/s
Compresibilidad del flujo	Incompresible, mach < 0,3
Estacionariedad del flujo	Estacionario
Lugar	Circuito de Motorland de Aragón



6. 2 Alerones de Geometría variable

El primer modelo que se va a simular, es un alerón de geometría simple, lo único que se busca con este alerón es la máxima superficie que sirva para romper el flujo de aire y contribuir a la frenada. Este primer alerón tiene un ángulo de ataque de 80 grados y un perfil de ataque de 10 mm, para provocar un rápido desprendimiento de la capa límite. El área que está en contacto con el aire es de $0,0069 \text{ m}^2$ en la dirección de desplazamiento de la motocicleta que será respecto al eje z sentido negativo. En la siguiente imagen se puede observar el perfil del alerón y se puede apreciar la simplicidad de su geometría pero que nos servirá de punto de partida para los demás modelos.

6.2.1 Alerones con geometría variable de tipo fowler

Este modelo, consta de tres piezas, es decir, consta de tres alerones, todos ellos diferentes y con distintos ángulos y bordes de ataques. Este alerón, está basado en los frenos aerodinámicos de los aviones, que se explicará a continuación.

6.2.1.1 Frenos aerodinámicos de las aeronaves

Las aeronaves poseen varios sistemas de frenado, pero uno de ellos, el que utilizaremos como punto de partida para nuestro diseño, es el freno aerodinámico.

Este freno va situado en la parte final de las alas de los aviones Y se denomina “spoiler”, son unas superficies que se despliegan en la parte superior del ala y su función es doble. Presentan una resistencia al avance y, además, anula parte de la fuerza de sustentación del ala (la que provoca que el avión se eleve), por lo que el peso aumenta sobre el tren de aterrizaje e incrementa la efectividad de los frenos.

Con el despliegue de estos alerones lo que se consigue es una reducción importante en la distancia de frenada de los aviones permitiendo un aterrizaje más rápido, en la siguiente imagen se puede observar la comparativa entre un aterrizaje con frenos aerodinámicos (avión de la izquierda) y otro sin frenos aerodinámicos, (imagen de la derecha).

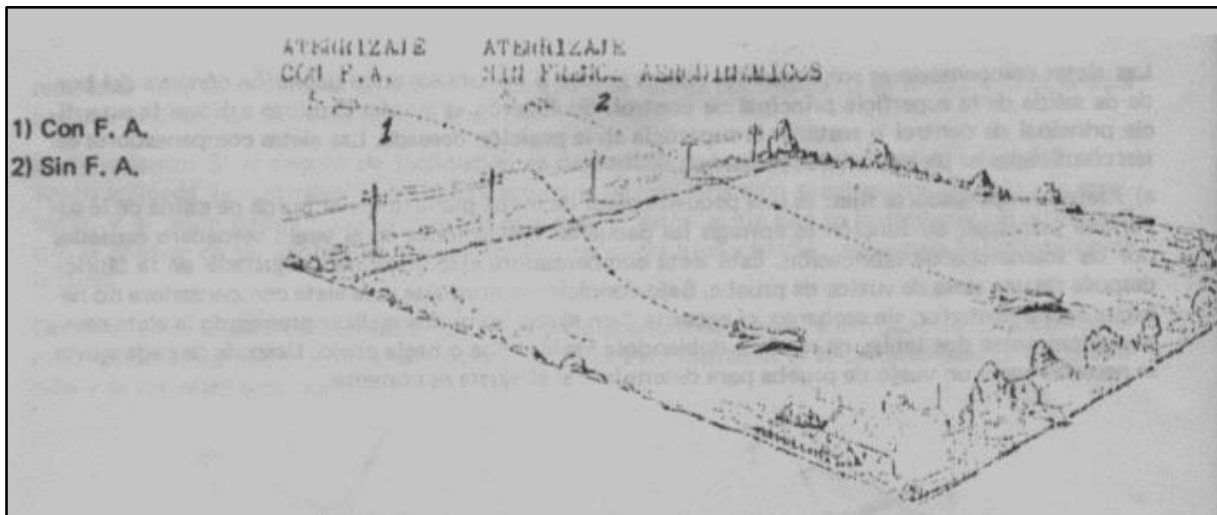


Ilustración 95: Operación de frenos aeronáuticos

Existen varios formatos de despliegues de estos alerones, todos forman parte de las alas pero cada uno tiene su sistema como veremos a continuación:

- a) **De tipo sencillo:** En este caso los alerones se despliegan en la parte final del ala y hacia abajo, y que completan el ala al estar este en posición neutral.

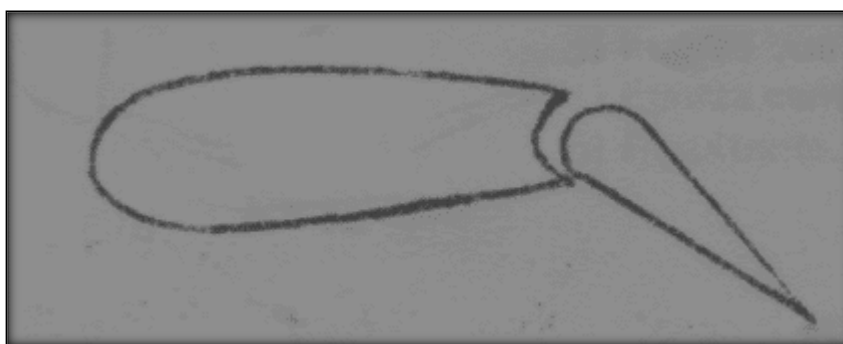


Ilustración 96: Frenos desplegados de tipo sencillo

- b) **De tipo Fowler:** Es un dispositivo por medio del cual la parte baja de la sección de salida del ala recobra su posición deslizándose sobre el riel.

Este movimiento aumenta la anchura y las fuerzas del ala cuando está en parte extendida y hace bajar el borde de salida del ala aproximadamente 40 grados por debajo de su posición plegada cuando ésta se encuentra enteramente extendida

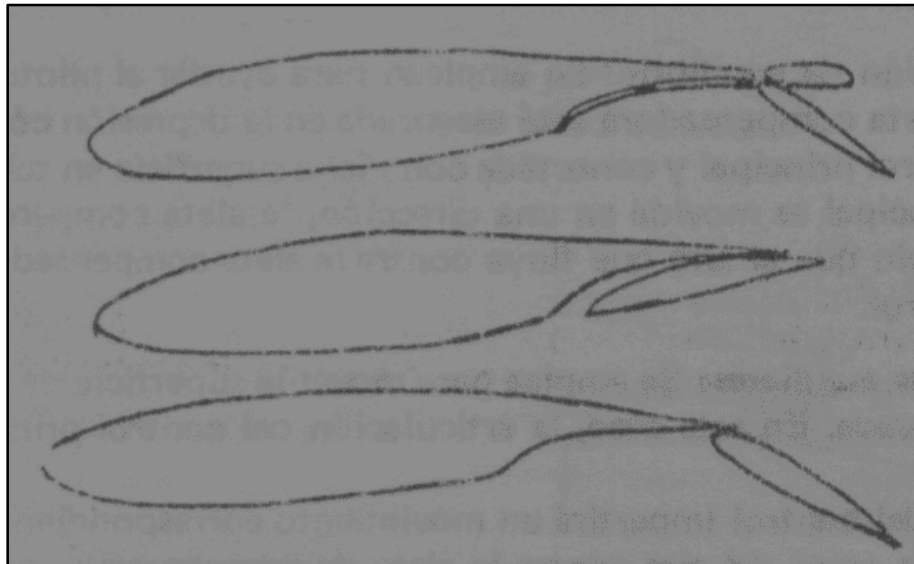


Ilustración 97: Frenos aerodinámicos tipo Fowler

- c) **Freno tipo ranura**: Es un dispositivo donde una parte de la salida del ala se mueve sobre un riel dejando una abertura entre el borde de salida del ala y el borde de salida del freno aerodinámico, de manera que el aire pueda pasar a través de la ranura y sobre el freno aerodinámico y aumentar la fuerza de frenada.



Ilustración 98: Freno tipo ranura

- d) **Freno de tipo partido:** Es la mitad inferior de una sección de salida de ala que está encajada para poder bajarla. La mitad superior también puede ser encajada para poder levantarla para aumentar la resistencia al avance sin disminuir la fuerza lift. Algunos de los frenos aerodinámicos están perforados para ayudar la resistencia al avance y permitir que las superficies de la cola operen más eficientemente que cuando está cobijado por la estela de un freno aerodinámico partido.

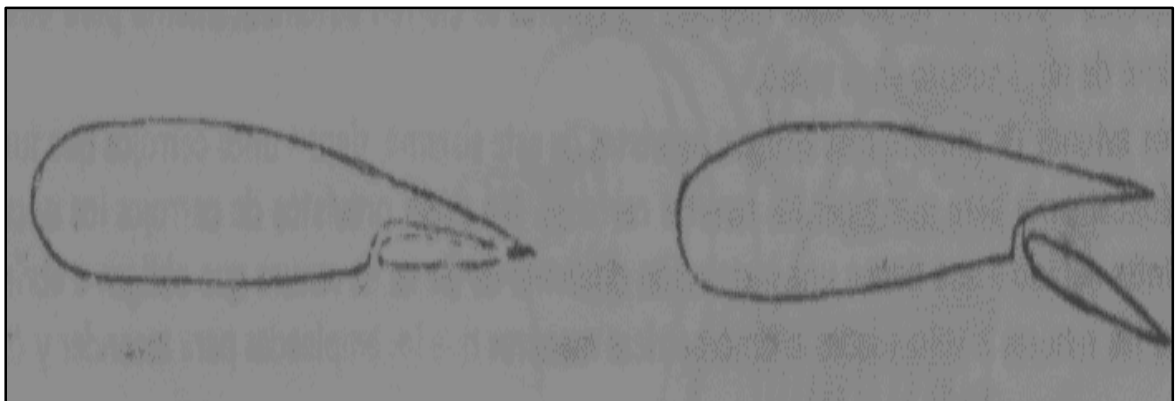


Ilustración 99: imagen de los frenos aerodinámicos partidos

Una vez analizados los frenos aerodinámicos de las aeronaves, y el sistema de frenado de los coches de la Nascar comentados en la introducción, utilizaremos estos como inspiración para nuestros modelos de alerones. Pero con grandes variantes, ya

que sobre todo, en tamaño, posición y velocidad, no pueden ser extrapolados a nuestro guardabarros pero sí servirá para partir de esta idea.

Nuestro objetivo principal, es conseguir el mayor valor de drag posible, mediante la ruptura lo antes posible de la capa límite y generando gran turbulencia tras el paso del alerón. Para llevar a cabo esto, realizaremos numerosas simulaciones, y en este proyecto únicamente, en resultados, se expondrán, el primer modelo de partida, otros modelos muy próximos al modelo final y el modelo final que será debidamente seleccionado y justificado.

6.2.1.2 Terminología de perfiles aerodinámicos

Empezaremos por definir la terminología del perfil.

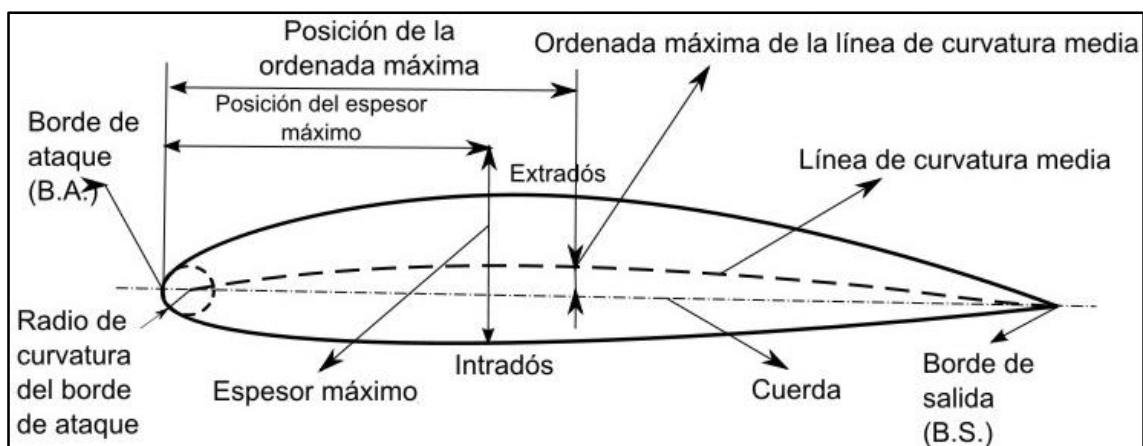


Ilustración 100: Terminología de un perfil

- a) **Cuerda:** Es la línea recta que une el borde de ataque (b.a) con el borde de salida (b.s). Es una dimensión característica del perfil.
- b) **Línea de curvatura media:** Es una línea equidistante entre la extradós y el intradós. La forma de esta línea es muy importante en las características aerodinámicas del perfil; en definitiva, fija la curvatura del perfil. Si la línea de curvatura media, cae por encima de la cuerda como en la IlustraciónX, se dice que la curvatura si va en un tramo por arriba y en otro por debajo.

- c) **Ordenada máxima:** De la línea de curvatura media: Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda; este valor y su posición a lo largo de la cuerda ayuda a definir la forma de la línea de curvatura media. El valor de la ordenada máxima, y su posición suelen darse en forma de % de la cuerda.
- d) **El espesor y la distribución de espesor:** Son dos características importantes. El valor del espesor máximo y su posición se expresan en % de la cuerda. El valor del espesor varía desde un 3% en los muy delgados hasta un 18% en los muy gruesos.
- e) **El radio de curvatura del b.a.:** Define la forma del b.a., y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós, y con su centro situado en la línea tangente en el origen a la línea de curvatura media. Su magnitud define la agudeza del b.a. y tiene efectos importantes en las características de pérdida. Un radio de curvatura de b.a. de valor pequeño significa un b.a. agudo y puede causar una separación temprana de la capa límite cerca del b.a.

La acción de la corriente de aire sobre un perfil produce, por diferentes motivos, una fuerza aerodinámica. Esta fuerza es usual descomponerla en dos componentes: sustentación y resistencia como podemos observar en la ilustración X

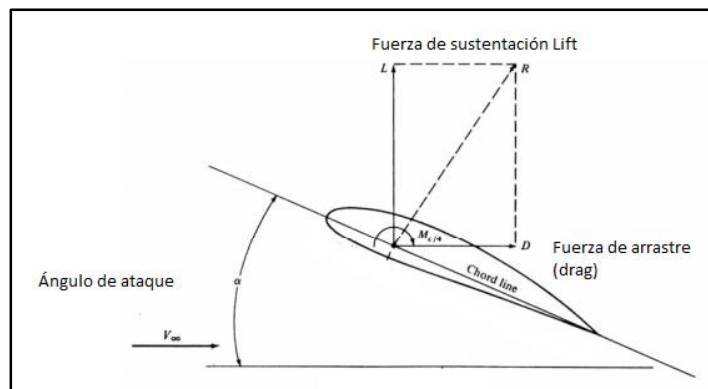


Ilustración 101: Fuerzas aerodinámicas

- **Sustentación:** Es la componente perpendicular a la corriente libre de aire.
- **Resistencia:** Es la componente paralela a la corriente libre de aire
- **Ángulo de ataque:** Es el que existe entre la cuerda, y la dirección de la corriente libre de aire.

6.2.2 Coeficiente de sustentación y resistencia

Colocamos un perfil asimétrico en un túnel aerodinámico. Observamos que en nuestro perfil aparecen dos fuerzas, una en la dirección de la corriente de aire, resistencia y la otra en dirección perpendicular, sustentación.

Si colocamos el mismo perfil variando el ángulo de ataque y manteniendo el resto de parámetros constantes, y medimos las fuerzas de sustentación y resistencia originadas y a continuación calculamos los cocientes de L entre $q \cdot S$, siendo L la fuerza de sustentación, S la superficie alar y q la presión dinámica, obtendríamos un coeficiente adimensional, denominado C_L , coeficiente de sustentación.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (5.1)$$

$$C_L = \frac{L}{q \cdot S} \quad (5.2)$$

$$C_d = \frac{D}{q \cdot S} \quad (5.3)$$

Efectuando los mismos pasos con la resistencia D (drag), observamos que las fuerzas de resistencia D variarían con la velocidad, densidad y ángulo de ataque, pero el coeficiente de resistencia C_D , definido como: $C_D = D/(q \cdot S)$ sólo depende del ángulo de ataque (5.3).

Al igual que el coeficiente de resistencia, el coeficiente de sustentación depende solamente del ángulo de ataque, porque como podemos ver en la ecuación (5.2) aunque aumentemos la velocidad, aumenta la fuerza de sustentación pero también aumentara el cociente $q \cdot S$.

6.2.3 Resultados del modelo simulado 1

Este es el primer diseño con el que se comienza el proyecto, para realizar un buen análisis de los datos y llegar a un buen modelo, se decide partir desde cero con un modelo muy sencillo, un único alerón, con geometría simple, los datos del alerón se exponen a continuación.

6.2.3.1 Valores de los perfiles

Perfil simétrico

Borde de ataque: 10mm

Ángulo de ataque: 80 grados.

Cuerda 100 mm

Espesor: 17,8%

Distribución del espesor: 50%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%

Posición de la ordenada máxima: 0%

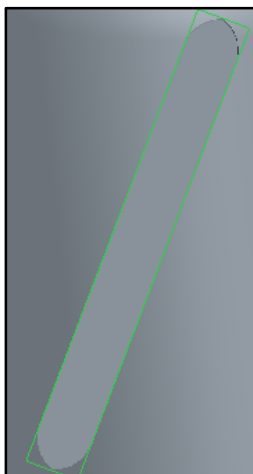


Ilustración 102: Perfil del modelo 1

A continuación se expone la visualización del alerón completo del primer modelo.

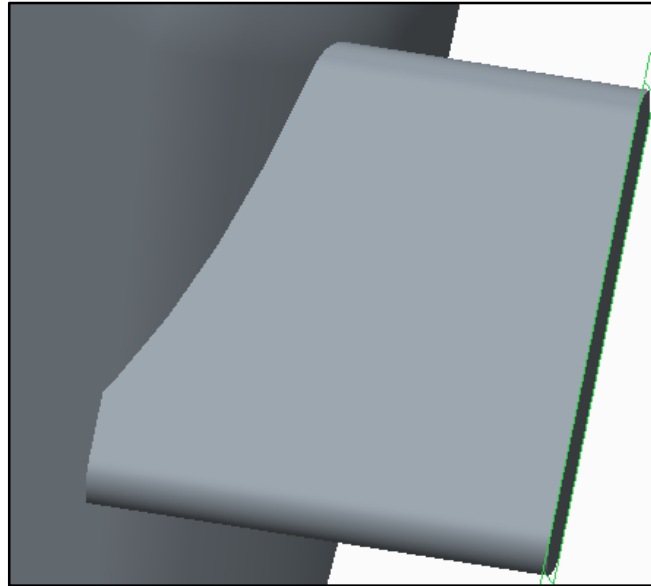


Ilustración 103: Alerón del primer modelo

6.2.3.2 Cálculo del número de Reynolds

A continuación, calcularemos el número de Reynolds para este diseño, como se comentó con anterioridad.

Conocemos los parámetros del número de Reynolds:

$$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$$

$$V = 44 \text{ m/s}$$

$$L = 0,03 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,03 \text{ m}}{1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 91213.48 \rightarrow 10^4 < Re < 10^6$$

Como hemos visto anteriormente, nos encontramos en la región turbulenta con moderada dependencia del número de Reynolds.

Como podemos ver en la anterior ilustración, el primer modelo que se va a analizar es muy sencillo, y los resultados que se van a obtener son muy pobres con respecto a los que queremos conseguir, por tanto, no se van a analizar con profundidad como se harán con modelos con resultados mucho mejores.

Lo primero que vamos a analizar, son las fuerzas de arrastre de este modelo que son de 8.2139 N, el signo negativo es que la fuerza va en contra de la dirección del movimiento de la moto. Hay que añadir que esta fuerza únicamente es para los alerones de un lado, ya que realizamos la simulación sólo de la mitad, para simplificar los cálculos y reducir las esperas. La fuerza total que se obtiene es de 16.4278 newton, valores muy lejos de los que queremos lograr.

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron	-8.214838	0.00092046423	-8.2139176

Net	-8.214838	0.00092046423	-8.2139176

Ilustración 104: Valores de fuerzas de arrastre aportados por el programa

Otro parámetro a analizar, es un gráfico en el cuál con colores podemos ver la presión que se realiza sobre el alerón en todos sus puntos. Como podemos ver en la imagen, y correspondiéndose con la teoría, los valores de mayor presión son la parte superior del alerón donde se produce la resistencia aerodinámica y los de menor presión es en la parte posterior de los alerones, donde el aire circula con menor medida y con mayor velocidad como veremos más adelante. En la siguiente ilustración podemos ver este gráfico.

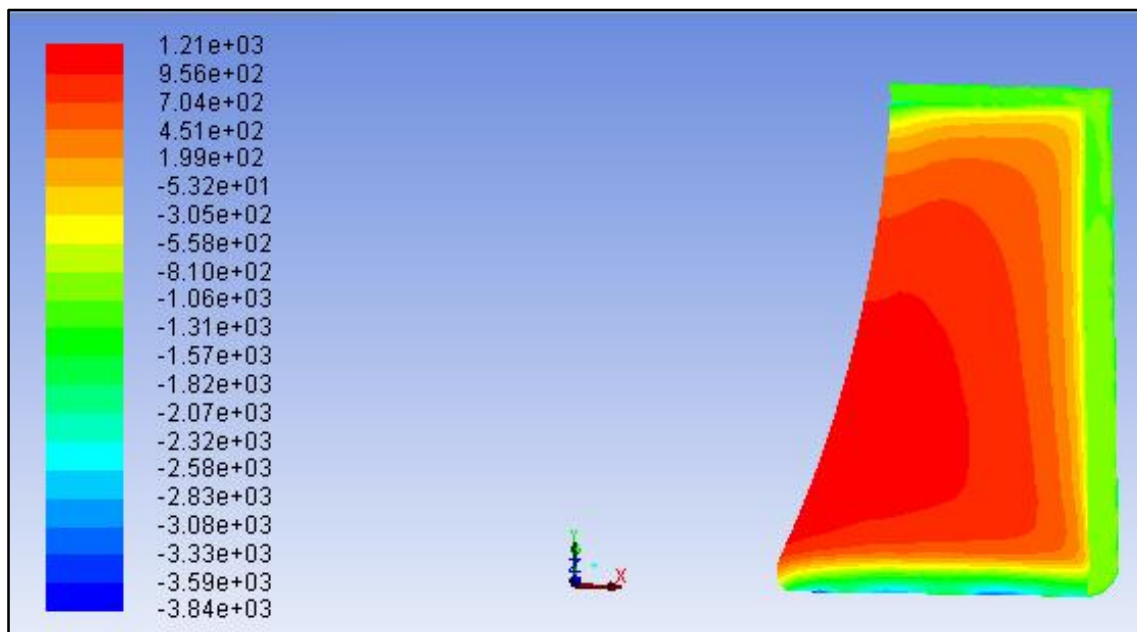


Ilustración 105: Gráfico de presiones en el alerón

Podemos observar, que se desaprovecha una buena parte del alerón para crear resistencia aerodinámica, ya que zonas rojas, que son las de mayor presión, únicamente se da en una zona muy pequeña y existe una gran zona de color verde con presiones muy bajas, con lo cual el alerón no ejerce demasiada resistencia al aire, y ello conlleva los pobres datos de fuerza drag.

Analizaremos a continuación, los vectores de velocidad del aire sobre los alerones. En la ilustración se puede observar que en las zonas de mayor presión la velocidad del aire es mínima, y las zonas de menor presión, son las zonas de máxima velocidad, como se puede ver en la teoría, por lo tanto, los datos obtenidos son válidos.

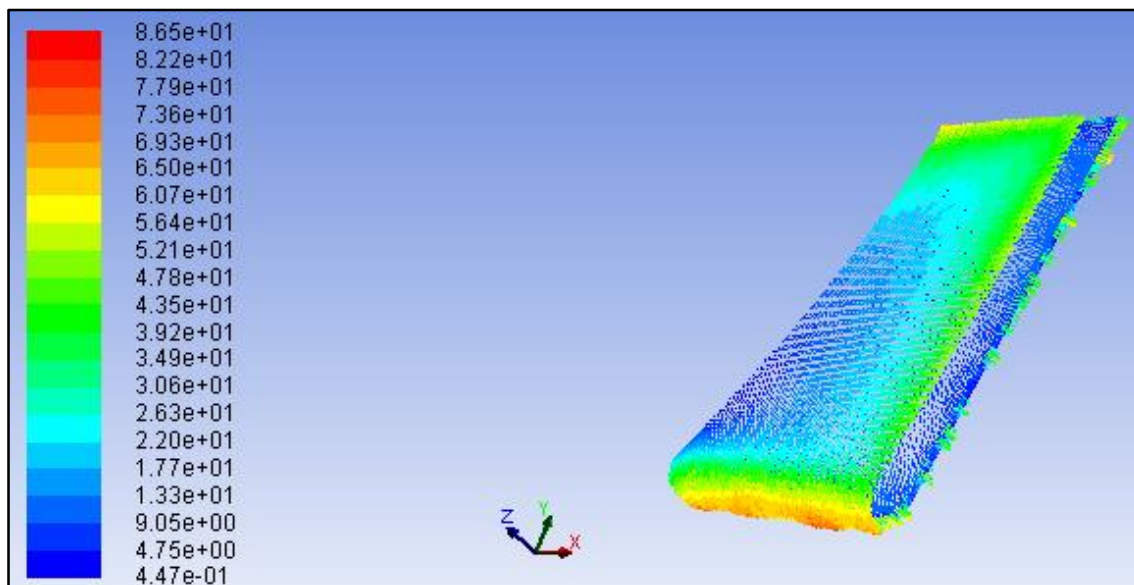


Ilustración 106: Gráfico de los vectores de velocidad sobre el alerón

Como consecuencia de los pobres resultados obtenidos, no se seguirán analizando este modelo de alerones. Los próximos diseños se realizarán en caminados en otra dirección, se intentará diseñar modelos más próximos a los frenos aerodinámicos de las aeronaves, con los cuales se quiere lograr resultados mucho mejores a los de este modelo.

6.2.4 Resultados del modelo simulado 2

Este de modelo, partimos de los fundamentos teóricos de los frenos de las aeronaves, como se explicó anteriormente. En este modelo, se ha sustituido un alerón por tres, colocados a diferentes alturas, con diferentes ángulos de ataque. Comentar que este modelo, es el segundo de la memoria pero se ha llegado a él tras realizar numerosas simulaciones y descartar numerosos diseños anteriores hasta llegar a este, en el cuál las fuerzas obtenidas son de considerable magnitud. Se utiliza varios

alerones para potenciar las fuerzas de arrastre, consiguiendo valores superiores que si sólo existiese uno.

Los elevados valores de ángulos de ataque, se han considerado tras la simulación de numerosos casos anteriores. Se han elegido estos, ya que crean elevadas resistencias aerodinámicas y no generan tantas turbulencias que si hubiésemos llegado a valores límite como 90 grados y conociendo de tablas y estimaciones ya estudiadas, que ángulos de ataque a partir de 25 grados, comienza a no producirse sustentación y a aumentar exponencialmente el valor del coeficiente drag.

6.2.4.1 Valores de los perfiles

-Primer alerón:

Perfil simétrico
Borde de ataque: 7 mm
Ángulo de ataque: 80 grados.
Cuerda 52 mm
Espesor: 28,8%
Distribución del espesor: 50%
Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%
Posición de la ordenada máxima: 0%

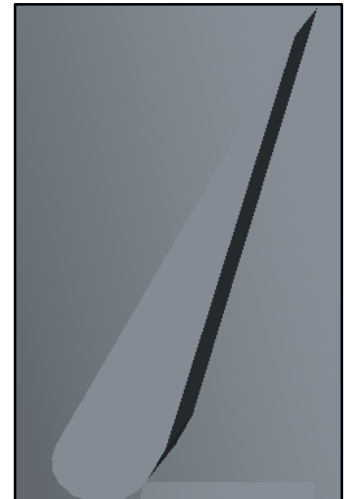


Ilustración 107: Perfil del primer y segundo alerón

-Segundo Alerón:

Perfil simétrico
Borde de ataque: 5 mm
Ángulo de ataque: 75 grados.
Cuerda 61 mm
Espesor: 18,8%
Distribución del espesor: 50%
Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%
Posición de la ordenada máxima: 0%

-Tercer alerón:

Perfil simétrico

Borde de ataque: 2 mm

Ángulo de ataque: 80 grados.

Cuerda 26 mm

Espesor: 16,8%

Distribución del espesor: 50%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%

Posición de la ordenada máxima: 0%



Ilustración 108: tercer perfil

A continuación se incluye una imagen de la disposición de los alerones en el guerdabarros:

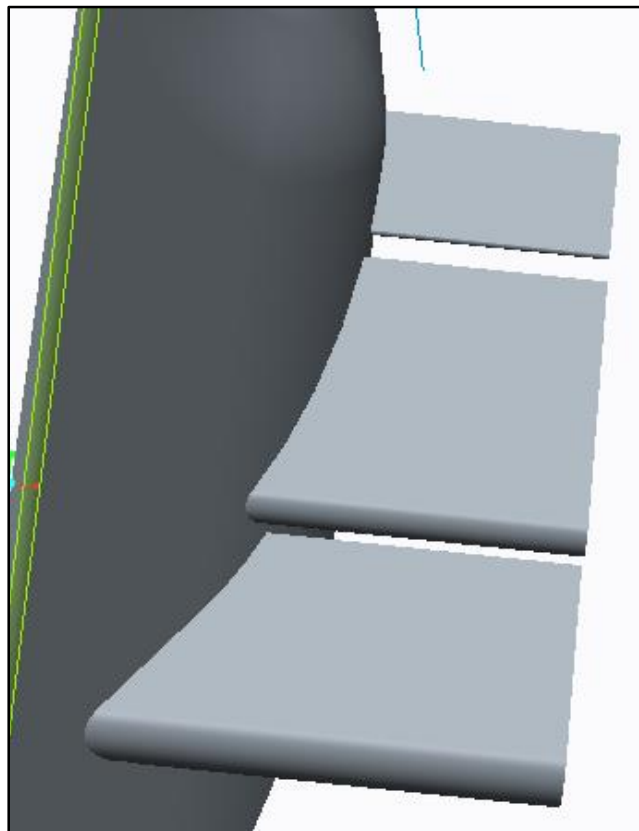


Ilustración 109: Alerones simulación 2



6.2.4.2 Cálculo del número de Reynolds

A continuación, calcularemos el número de Reynolds para este diseño, como se comentó con anterioridad.

Conocemos los parámetros del número de Reynolds:

$$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$V = 44 \text{ m/s}$$

$$L = 0,06 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,06 \text{ m}}{1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 182426.996 \rightarrow 10^4 < Re < 10^6$$

Como hemos visto anteriormente, nos encontramos en la región turbulenta con moderada dependencia del número de Reynolds.

6.2.4.3 Resultados del modelo 2

Los resultados que obtenemos tras la simulación son de bastante mayor magnitud a los conseguidos en el caso anterior. Tras el periodo de análisis obtenemos que el alerón de este modelo consigue 31.7896 newtons de fuerza de arrastre (drag) como se puede comprobar en la siguiente imagen. Hay que tener en cuenta, que las simulaciones se llevan a cabo con simetría, por tanto solo se analiza la mitad, por tanto, hay que multiplicar por dos, todos los resultados obtenidos en el programa.

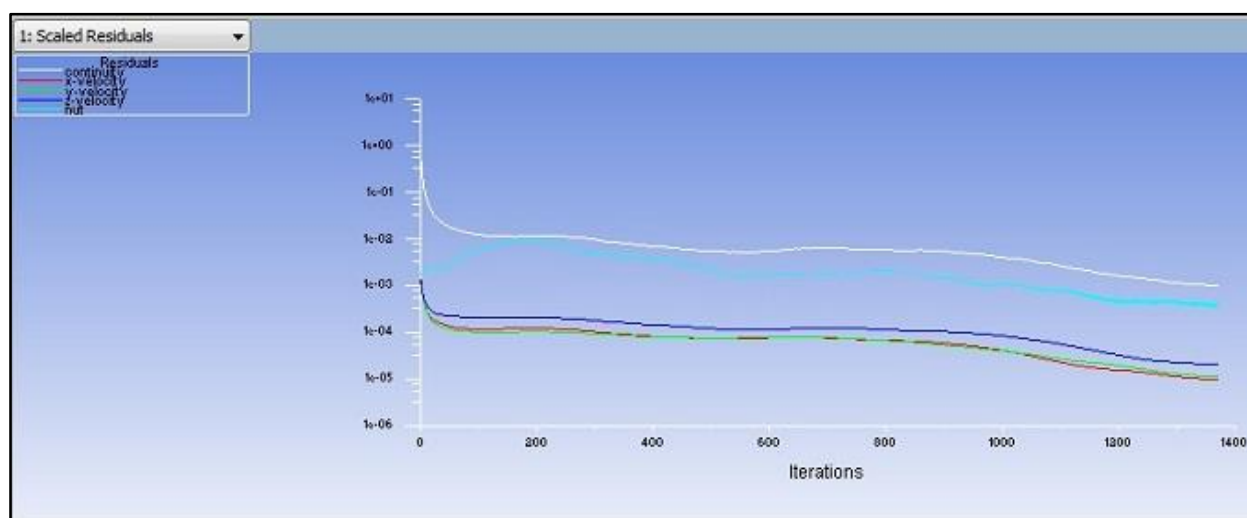


Ilustración 110: Gráfico de residuos del modelo 2

Los resultados de este perfil llegaron a convergir a las 1369 iteraciones, los residuos llegan a convergir en un valor por debajo o igual de 10^{-3} , lo cual para esta ecuación es aceptable. De esta manera podemos asegurar la fiabilidad de las soluciones cuando hablamos del proceso de cálculo

Forces - Direction Vector (0 0 -1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
aleron	15.894829	0.036845196	15.931674
<hr/>			
Net	15.894829	0.036845196	15.931674

Ilustración 111: Fuerzas drag

Los alerones no solo únicamente provocan fuerza de arrastre, sino también sustentación (lift) en este caso negativa, quiere decir que la fuerza que realiza el alerón pega el neumático de la motocicleta hacia el suelo ofreciendo más agarre. La fuerza que realiza es de 16.44 newtons, esta fuerza no es especialmente alta, lo que en nuestro caso, es bueno, ya que no cargamos en exceso el neumático y no provocamos una degradación de este en gran medida. Los resultados del programa se pueden ver en la siguiente imagen.

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleron	-8.214838	0.00092046423	-8.2139176
Net	-8.214838	0.00092046423	-8.2139176

Ilustración 112: Fuerzas Lift

Después de conocer las fuerzas, calcularemos el coeficiente de arrastre drag (Cd) de los alerones. Para ello, comprobaremos los resultados obtenidos por el programa, y los obtenidos teóricamente mediante su fórmula. El valor de Cd mediante el programa Cd dentro de una media realizada entre varias iteraciones, es de 2.375 y en la siguiente gráfica se puede comprobar que está entorno a esa magnitud.

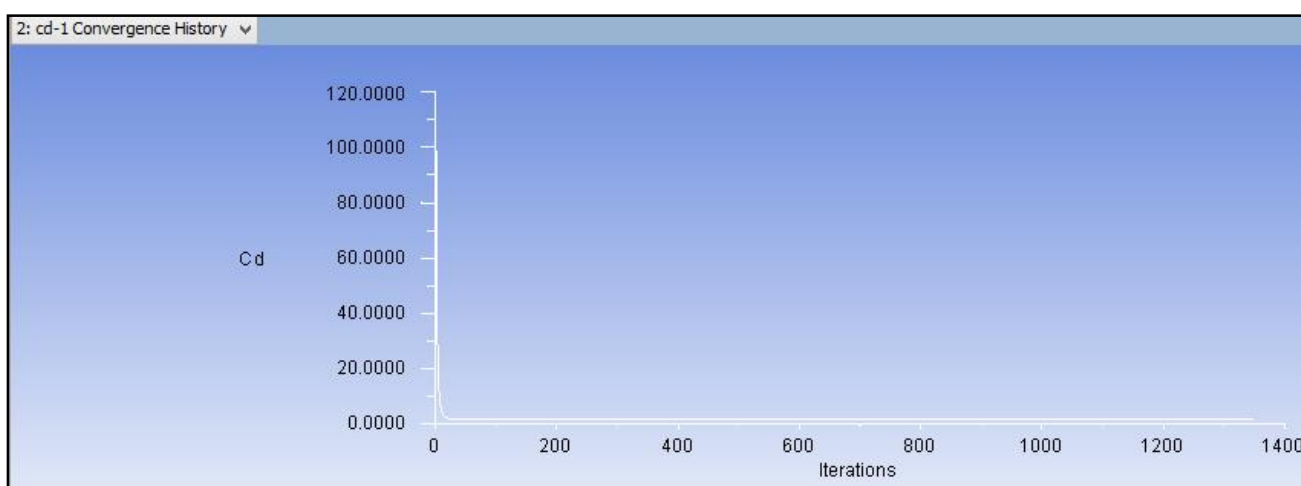


Ilustración 113: Gráfica de la evolución del drag en cada iteración

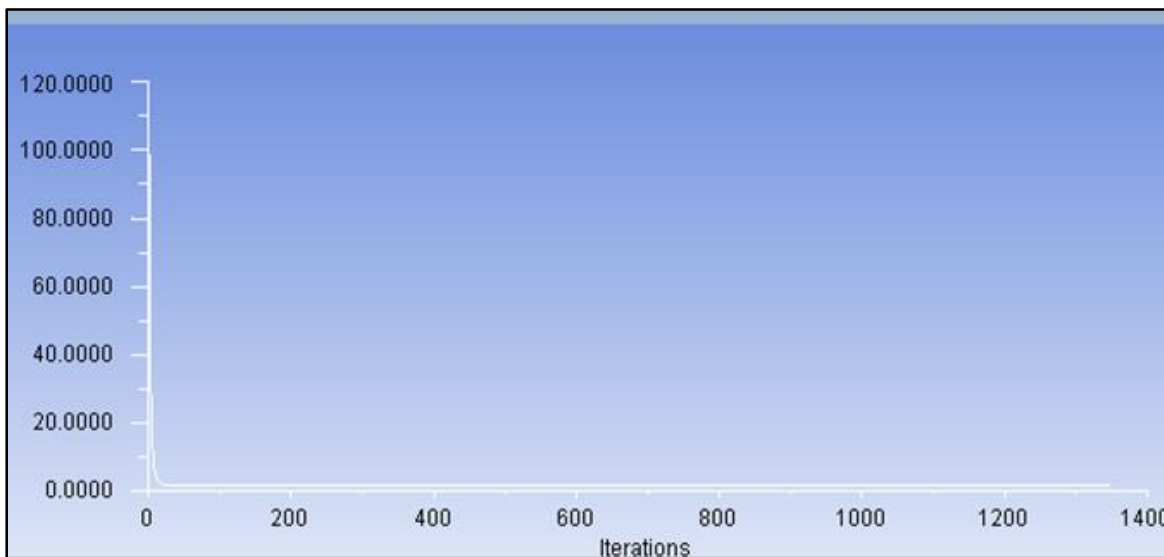


Ilustración 114: La misma gráfica anterior pero ampliada

Realizamos el cálculo teórico de C_d . La fórmula la ya comentada con anterioridad en este proyecto, es la siguiente:

$$(1) \quad D = qSC_D = \frac{1}{2}\rho V^2 SC_D$$

Donde cada parámetro se explica a continuación:

D - Resistencia. Se utiliza la "D" por el término inglés *drag* (arrastre).

ρ - Densidad del fluido.

V - Velocidad.

S - Superficie alar en planta.

C_D - Coeficiente aerodinámico de resistencia.

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (\text{Este término se determina presión dinámica}).$$

Por lo tanto, si de la ecuación 1 despejamos el coeficiente C_d , obtenemos la siguiente ecuación (2):

$$(2) \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 S}$$

Los datos para introducir en la ecuación son los siguientes:

Coeficientes	Valores
Fuerza drag (D)	31.7896 N
Velocidad (V)	44 m/s
Superficie (S)	0.01035 m ²
Densidad (ρ)	1.23 kg/m ³

Después de realizar los cambios de unidades pertinentes, obtenemos un valor de Cd de 2.572. Por tanto, tanto los valores teóricos como los hallados por el programa, están dentro de la misma orden de magnitud y por tanto los valores son correctos, la simulación es correcta.

Analizado los coeficientes y fuerzas, analizaremos como se distribuyen las presiones, las velocidades y las líneas de corriente. Comenzaremos con las presiones, en las siguientes imágenes se puede observar cómo se distribuyen las presiones. La primera imagen es una gráfica en la cual mediante puntos se analizan las presiones en los alerones.

Como se puede ver en la gráfica, en la primera parte, en el alerón más grande y más hacia abajo, es el que obtiene mayores presiones, más elevadas estas hacia fuera y menores en las zonas del alerón en contacto con el guardabarros. Observamos además, como se reduce la nube de alerones hacia la derecha y que corresponde con la reducción de superficie de los alerones segundo y tercero. Analizando la gráfica, podemos concluir, que hay que mejorar las presiones en las zonas colindantes al guardabarros y en el tercer alerón el que está más elevado.

Las presiones también se pueden analizar con las siguientes imágenes, que es un método gráfico que se observa sobre los alerones y que resumen los datos proporcionados por la gráfica anterior.

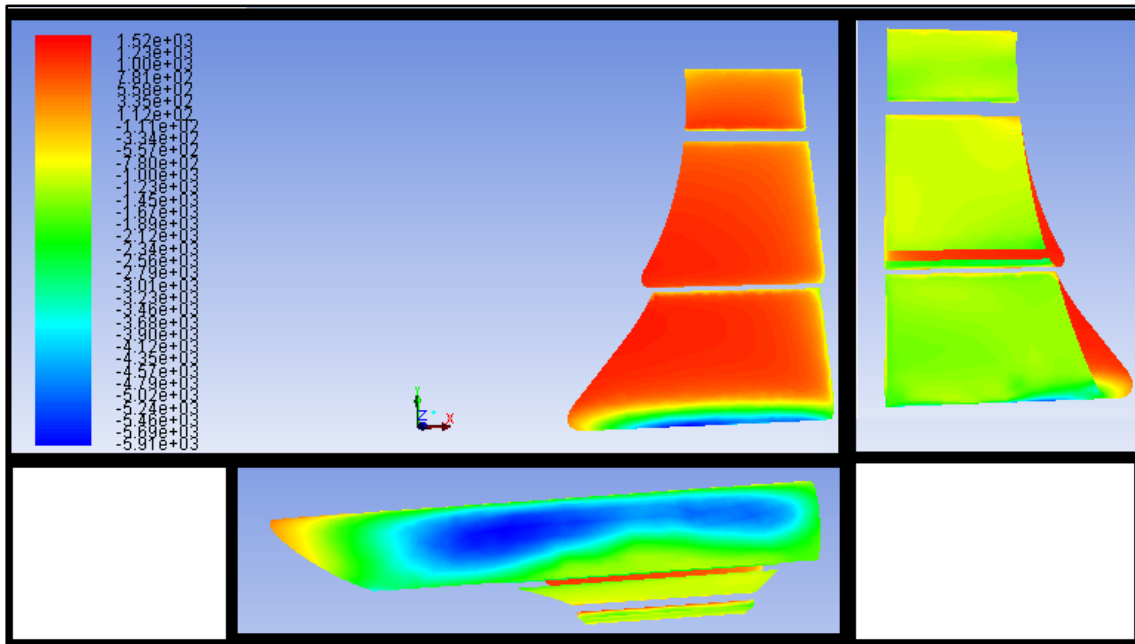


Ilustración 115: Presiones sobre los alerones

Comenzamos con la imagen la primera de la izquierda, vemos que sobre toda la superficie, las presiones son máximas, las de color rojo, que si tenemos en cuenta la teoría, es donde tiene que existir la zona de alta presión y menos velocidad. La imagen de la derecha, es la zona trasera de los alerones, donde tiene que existir zonas de menor presión, podemos comprobar que esta es negativa, quiere decir que existe una pequeña sustentación. En la imagen de abajo, podemos comprobar el borde de ataque del primer alerón, es el primero donde el aire hace contacto, por tanto, el aire debe alcanzar alta velocidades y por tanto bajas presiones, como se puede observar en la imagen, en este punto es la menor presión que existe en los alerones, por tanto, la zona de mayor velocidad y esto nos hace considerar que los resultados de la simulación son correctos.

Analizadas las presiones, analizaremos las velocidades y líneas de corriente que realiza el aire a través de los alerones, estas imágenes también nos las ofrece el programa y que se pueden ver a continuación.

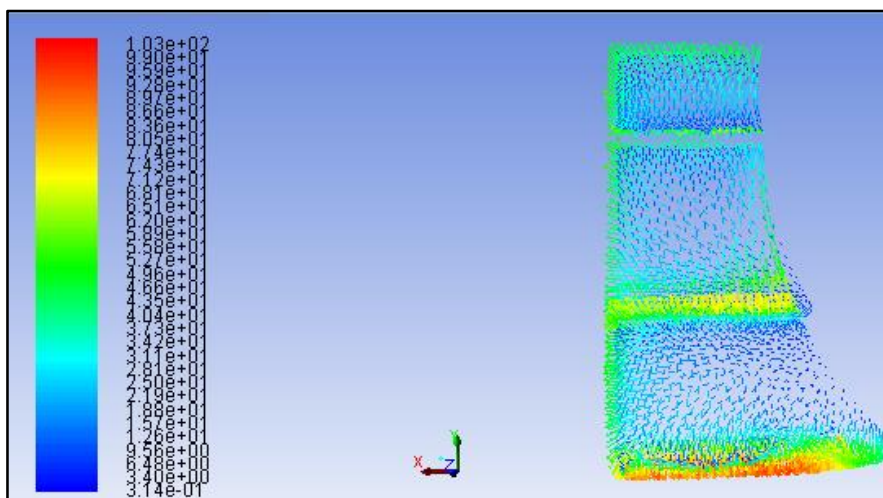
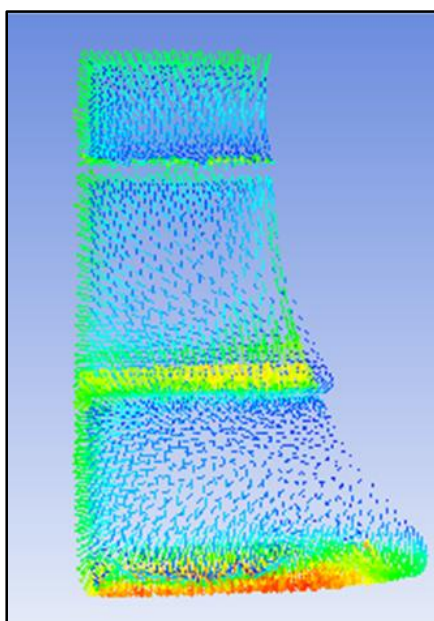


Ilustración 116: Vectores de velocidad sobre los alerones.



En la imagen 117 podemos ver la misma imagen pero ampliada para una mejor visualización de las líneas de corriente, es de decir, las direcciones que toma el aire en contacto con el alerón.

Ilustración 117: Vectores de velocidad ampliada.

En la anterior imagen podemos comprobar, que las zonas en las que la velocidad es menor, coincide con las zonas de mayor presión y al revés. En la imagen podemos comprobar, que especialmente en el primer alerón, las líneas de corriente no son ascendentes, sino que realiza giros y en círculos, esto se debe a que existen zonas de turbulencia en esta parte.

En los siguientes alerones, el segundo y el tercero y especialmente en el tercero, esta turbulencia se reduce en gran medida. En la siguiente imagen se puede ver lo que hemos comentado anteriormente del primer alerón.

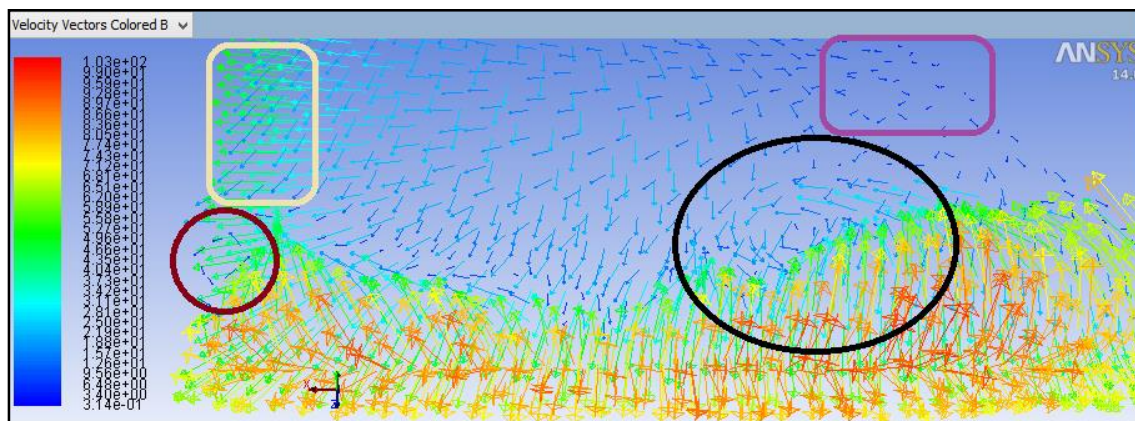


Ilustración 118: Detalle de turbulencias y cambios de líneas de corriente

En la siguiente imagen, podemos ver con más detalle lo anterior mencionado.

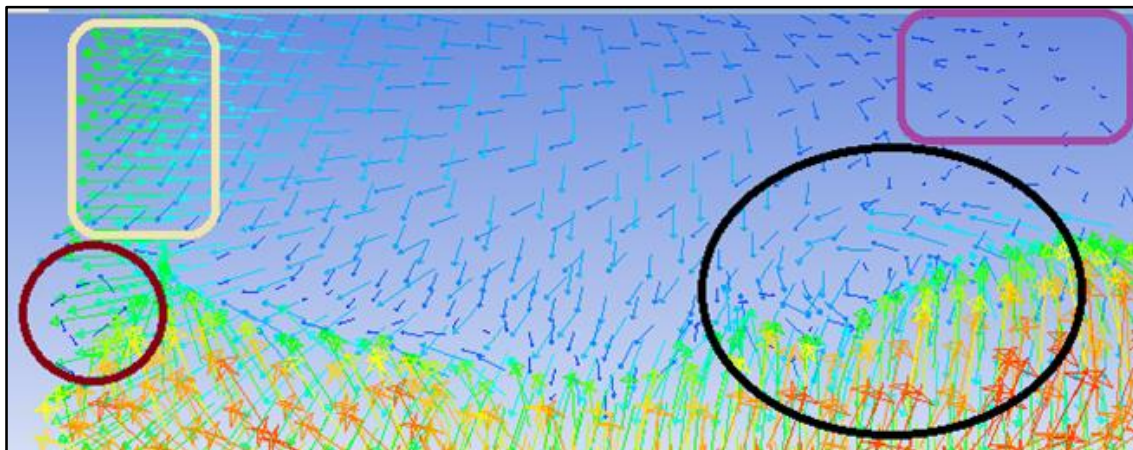


Ilustración 119: Imagen detalle ampliada.

Como comentamos con anterioridad, las zonas circulares de flujo de aire, se pueden observar en los círculos negro y marrón. En los rectángulos morado y color crema, se puede apreciar otro fenómeno que ocurre, no sólo en este alerón sino en los dos siguientes. Nos encontramos que el flujo de aire no es ascendente, sino que se desplaza hacia los lados de los alerones.

Este fenómeno intentaremos reducirlo en los siguientes modelos de simulación implementado en los alerones canaladuras que canalicen el aire de forma ascendente y así conseguir que el máximo aire posible impacte sobre los alerones.

En la siguiente ilustración, podemos apreciar, la grandes zonas de turbulencia que se producen tras el paso de aire de los alerones, los que nos genera una gran fuerza drag, y que bajo la teoría, este fenómeno se produce con elevados ángulos de ataque en los cuales desaparece la sustentación y se produce una pronto desprendimiento del aire de la capa límite generando turbulencia, que es justo lo que se aprecia en la imagen.

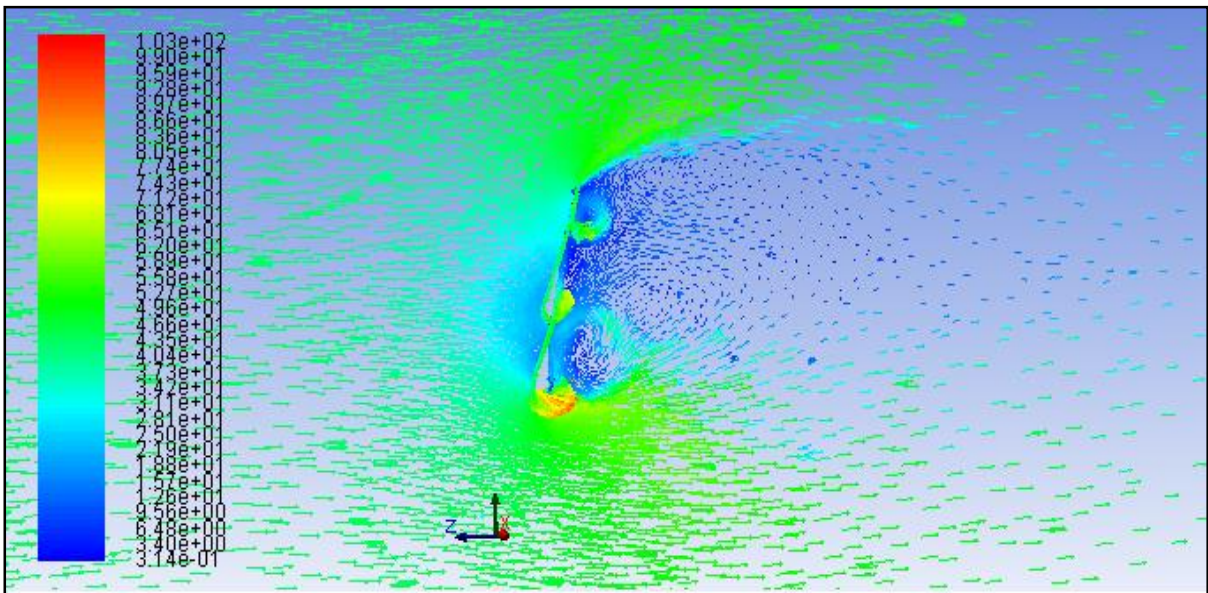


Ilustración 120: Líneas de corriente vista en plano perpendicular a los alerones.

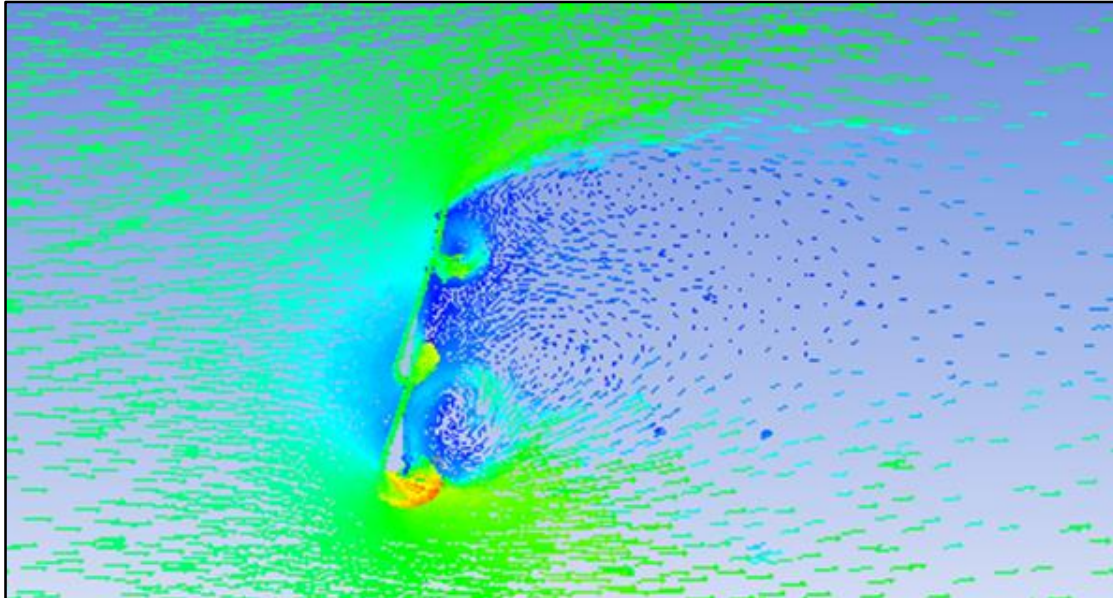


Ilustración 121: Imagen ampliada de líneas de corriente.

6.2.5 Resultado del modelo simulado 3

Este nuevo diseño, sigue dentro de los conceptos básicos de un freno aerodinámico de tipo Fowler, y simplemente es una evolución del modelo anterior al que se añade los carriles en el lado derecho de los alerones para redirigir el aire hacia los alerones y no que se escapen el aire hacia fuera como ocurre en el modelo anterior conllevando a una pérdida de flujo que no circula por los alerones provocando una menor fuerza de arrastre.

Los carriles que hemos incorporando simplemente son estructuras rectangulares de altura dos milímetros y de espesor dos milímetros como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Añadir que para este modelo, no calcularemos de nuevo los valores de Reynolds ni se especificará los parámetros de los perfiles, ya que no hemos cambiado ninguno de estos valores con respecto al modelo anterior.

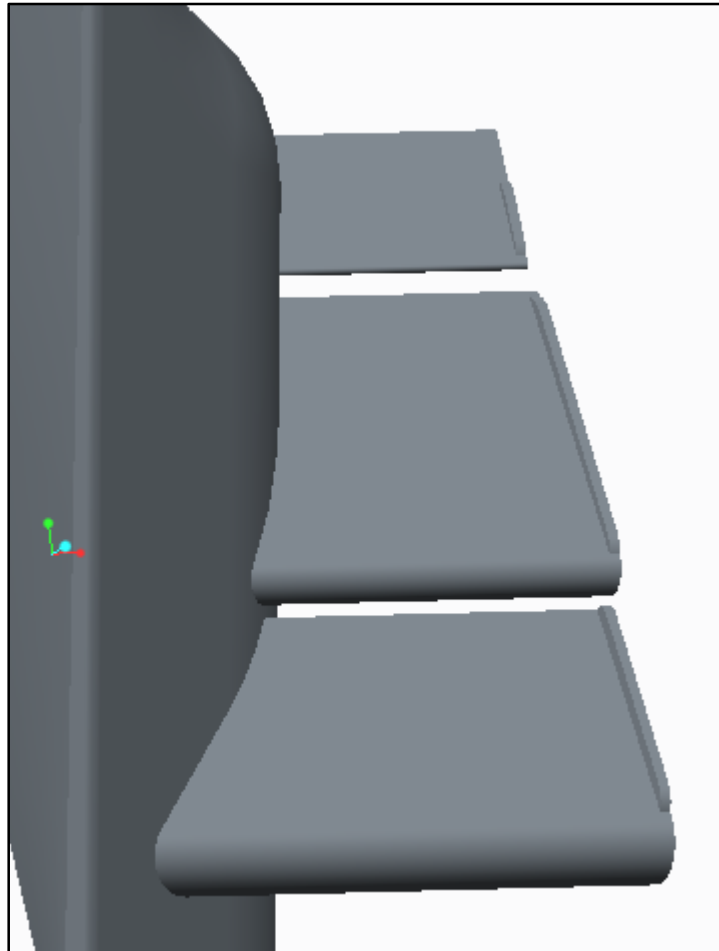


Ilustración 122: Alerones del modelo 2

Las condiciones de contorno se mantienen iguales que en el modelo simulado, también se mantienen los perfiles de los alerones y los ángulos de ataque exactamente iguales. Por tanto, a continuación se exponen los resultados de la simulación.

El primer punto de análisis va a ser el número de iteraciones que converge, que en este caso es de 1401 y además hay que gastar especialmente cuidado que los resultados de los residuos cuando converge estén por debajo de 10^{-3} para poder dar como válidos y fiables los datos obtenidos, y esto lo podemos comprobar en la imagen 123.

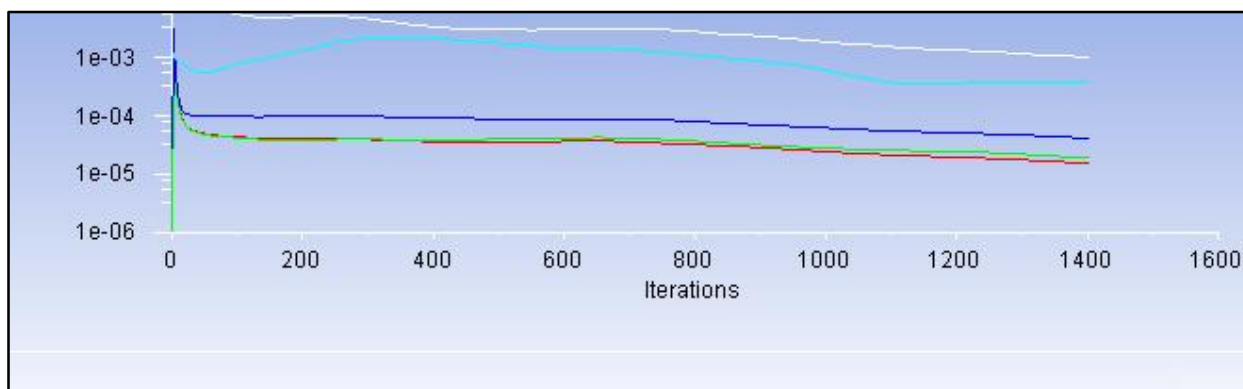


Ilustración 123: Gráfica de residuos en cada iteración e iteración en la que converge.

Una vez que podemos dar por válidos los resultados, podemos analizar estos, comenzamos por los valores de coeficiente drag obtenido del programa. Para este modelo es de 1.3069 y para el valor del coeficiente del lift es -6.491×10^{-1} como se puede apreciar en las dos siguientes imágenes.

Cl-1	Cd-1
-6.4961e-01	1.3075e+00
-6.4944e-01	1.3073e+00
-6.4927e-01	1.3071e+00
-6.4910e-01	1.3069e+00

Ilustración 124: Valores de coeficientes obtenidos por el programa

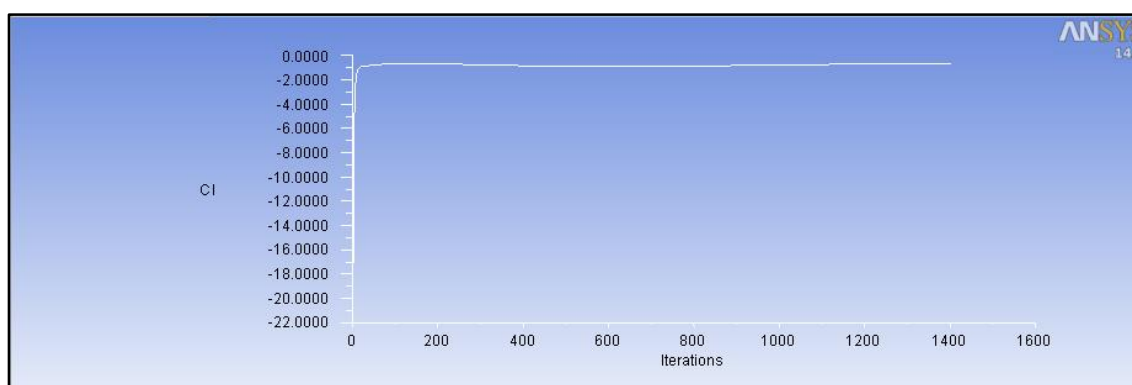


Ilustración 125: Gráfica del programa del cálculo del CI en cada iteración

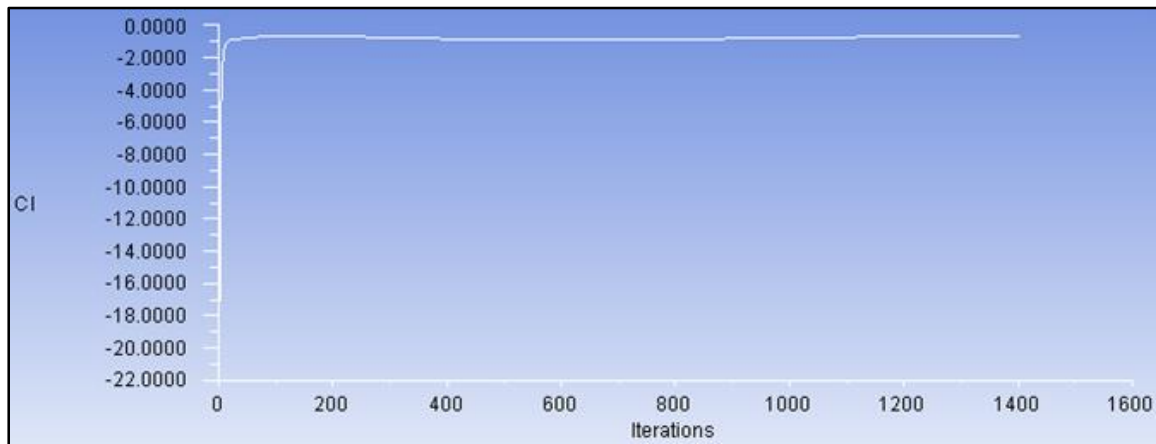


Ilustración 126: Ampliación gráfica Lift

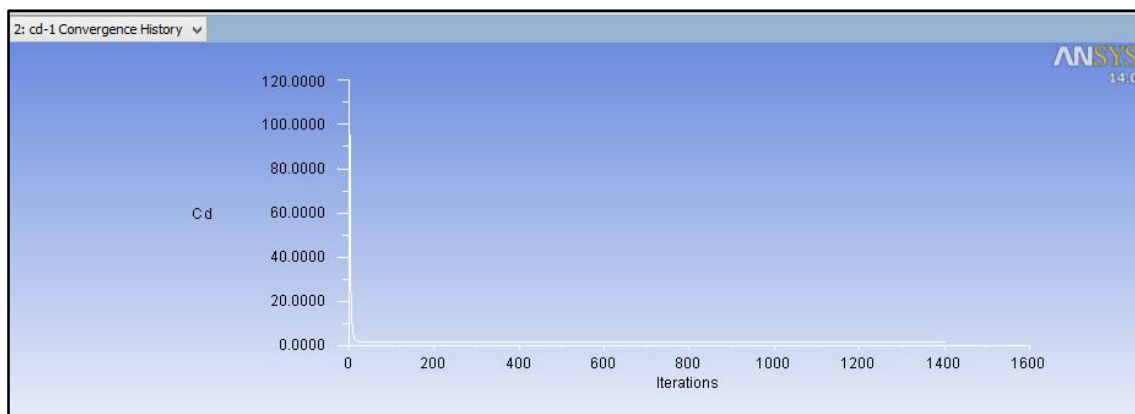


Ilustración 127: Gráfica del C_d para cada iteración

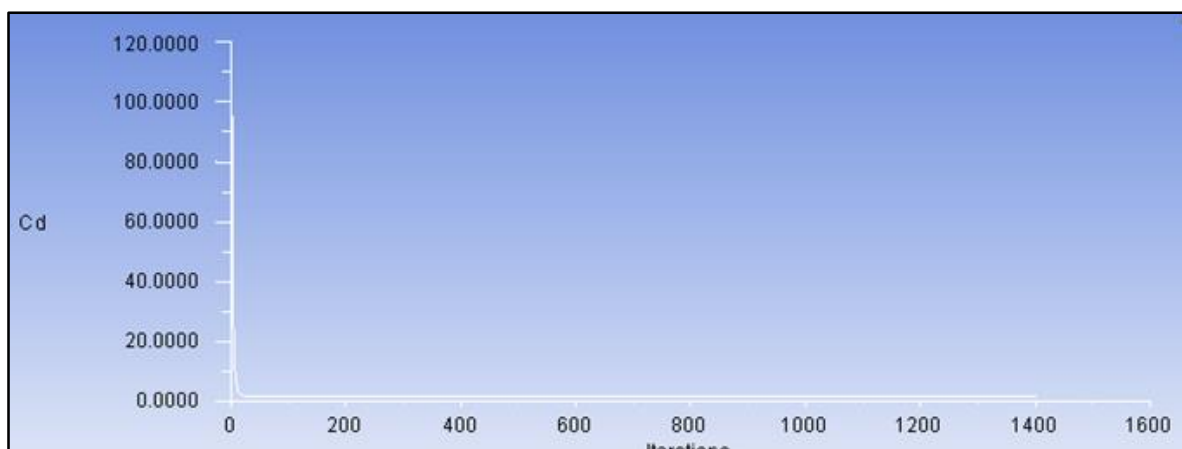


Ilustración 128: Gráfica C_d ampliada

Pero nosotros sólo analizaremos también teóricamente los valores del coeficiente drag teórico porque el valor que verdaderamente nos interesa es la fuerza de arrastre. Por tanto, como en el modelo anterior, ya se expuso las ecuaciones de para el cálculo del coeficiente teórico, en este modelo simplemente se expone su valor, considerando que el área de este diseño es de 0.0110 m^2 y la fuerza de 32.07 N el coeficiente que se obtiene es de 2.43316 . Como podemos ver, estos difieren, pero están dentro de la misma orden de magnitud y por tanto los damos como válidos.

Analizaremos a continuación los valores de las fuerzas drag aportadas por el programa. El valor que se obtiene es de $16,035 \text{ newton}$, recordando que sólo se analiza la mitad y que la fuerza total de arrastre (drag) es de 32.07 newton . Estos valores se pueden observar en la siguiente imagen.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleros	-16.000728	-0.034658116	-16.035386
Net	-16.000728	-0.034658116	-16.035386

Ilustración 129: Valor de la fuerza drag dada por el programa en newton

Con respecto a la fuerza lift, el programa nos ofrece un valor de -7.9641 newton , el valor es negativo, porque hemos tomado como referencia el eje y positivo y por tanto, el signo negativo nos aporta que no existe sustentación, sino que existe un mayor apoyo en el tren delantero, esto es bueno, porque queremos un mayor apoyo en el tren delantero para una mejor frenada, pero este número tampoco debe ser muy elevado porque provocaría una pronta degradación. El valor total de fuerza lift en el eje delantero es de -15.9282 newton . Lo podemos ver en la siguiente imagen.

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
aleros	-7.9642977	0.00010324144	-7.9641945
Net	-7.9642977	0.00010324144	-7.9641945

Ilustración 130: Valores fuerza lift aportados por el programa en newton

Con respecto al análisis de las fuerzas de presión en los alerones, el programa nos ofrece un gráfico por colores donde el color rojo es de mayor presión y el color azul el de menor presión. Los colores se ofrecen sobre los alerones para una mayor visualización de los resultados. En la siguiente imagen podemos ver que en la parte superior de los alerones es la de menor presión y la zona posterior y los bordes de ataque es de menor presión coincidiendo con las zonas de mayor velocidad y que podemos dar como valores válidos porque se corresponde con la teoría.

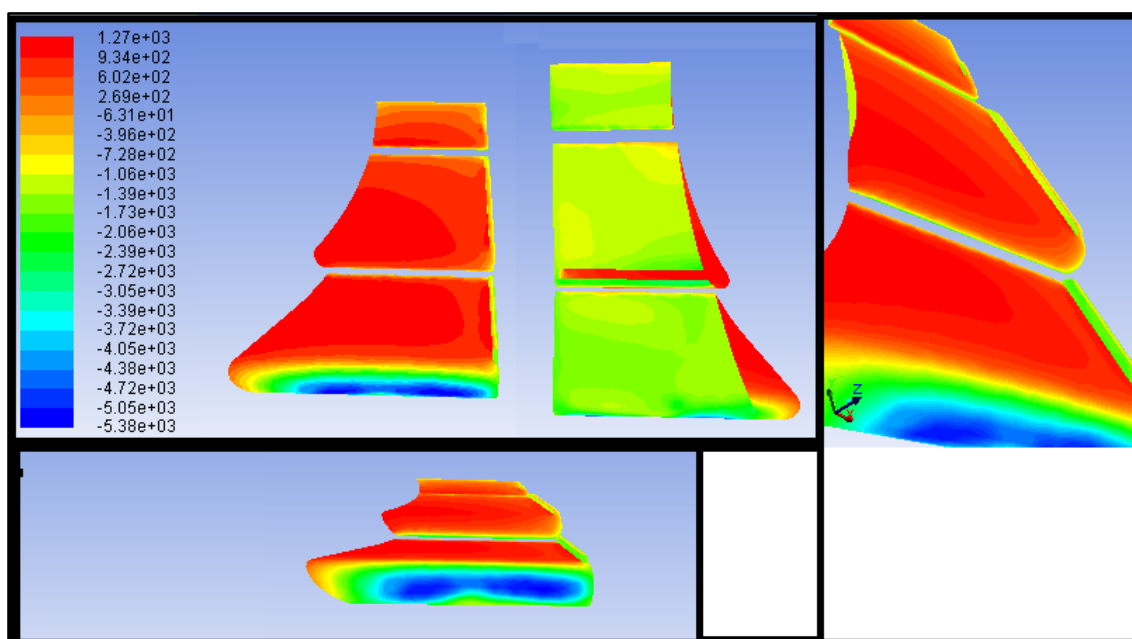


Ilustración 131: fuerzas de presión sobre los alerones

En la anterior imagen podemos ver la parte delantera a la izquierda, la parte posterior en la derecha y abajo visto desde frontalmente y por último en la imagen más a la derecha, la presión que se ejerce sobre los raíles de este modelo nuevo.

Analizamos las líneas de corriente o vectores de velocidad del aire sobre los alerones, para poder ver visualmente la dirección que toma el aire y si genera turbulencia en zonas donde no queremos que genere turbulencia. Por tanto, esta imagen que nos proporciona el programa es de gran utilidad.

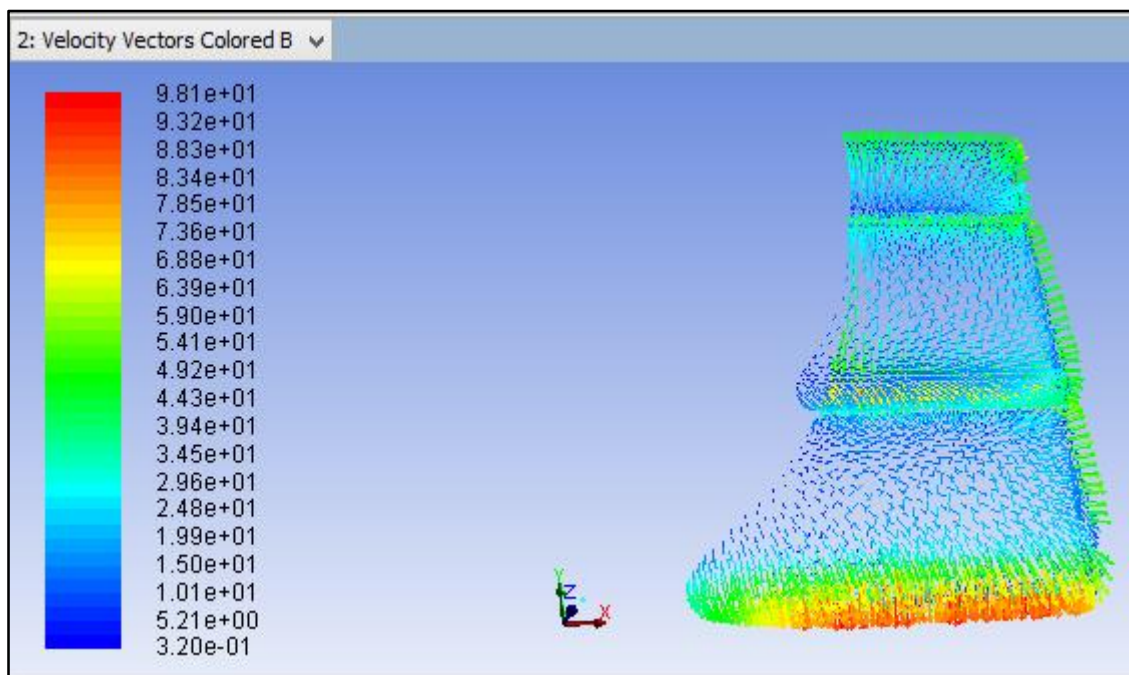


Ilustración 132: Vectores de velocidad

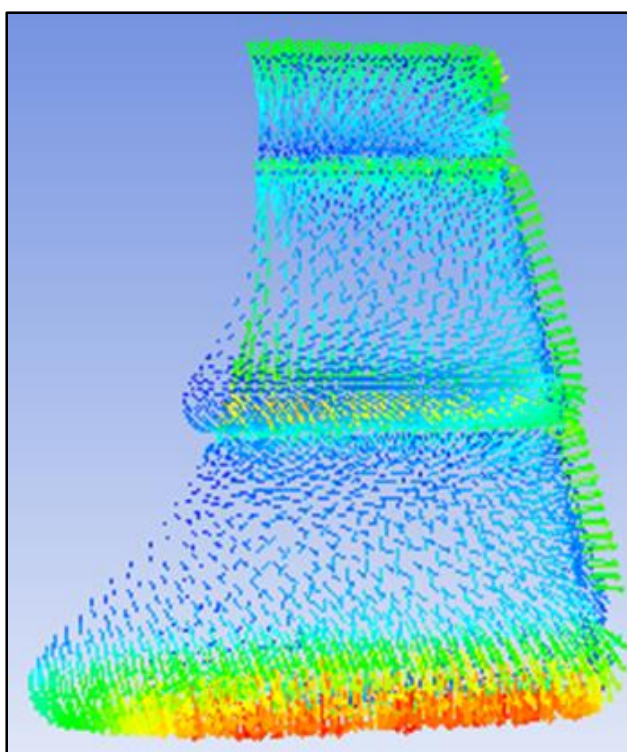


Ilustración 133: Ampliación de la imagen anterior

En la anterior imagen podemos ver las direcciones que sufre el aire en cada punto. Con respecto al modelo anterior, podemos ver que en el primer alerón se ha reducido en gran medida la turbulencia que existía.

Otro punto a destacar, es que existe un rebote bastante importante de aire con respecto la pared del guardabarros, que hace que el aire por el paso de estos no sea tan limpio, perdiendo eficacia. Otro detalle a destacar, es la parte de los raíles, donde se puede observar que el aire se canaliza y asciende hacia arriba, justo el efecto que queríamos conseguir al introducir estos.

Otro efecto que podemos analizar, es que parte del aire circula por encima de los raíles, conllevando a una pérdida de eficacia. Todo esto lo podemos ver con mayor detalle en las siguientes imágenes.

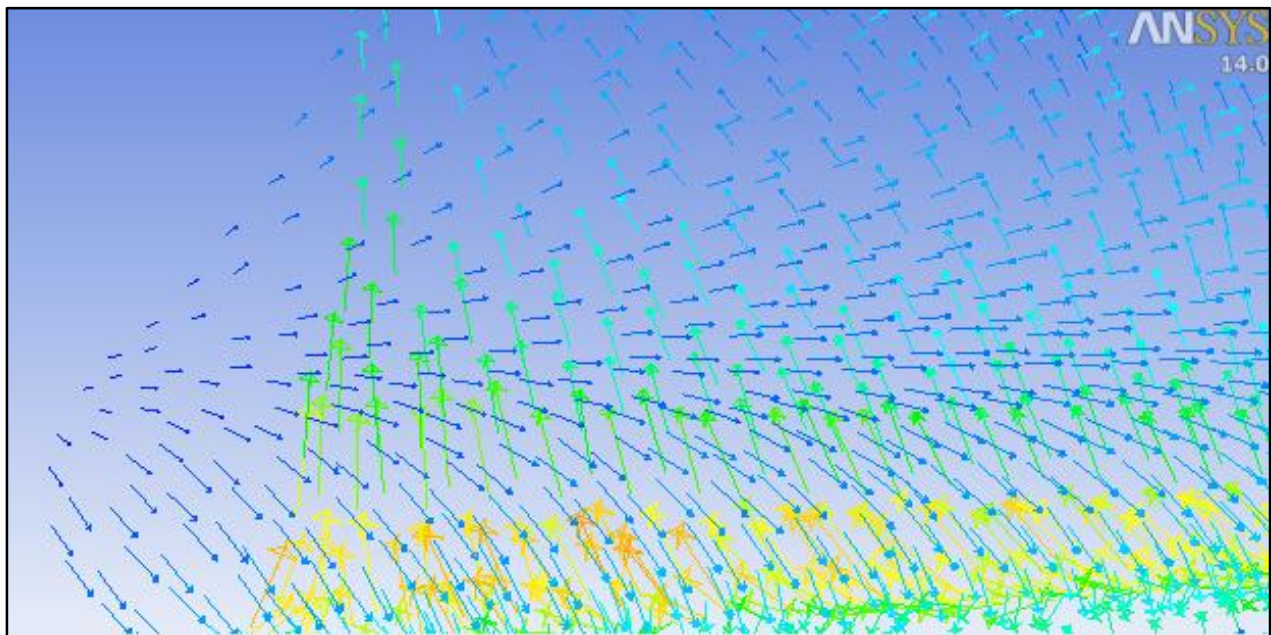


Ilustración 134: Efecto rebote del guardabarros

En la anterior imagen podemos ver con todo detalle, como el aire rebota del guardabarros y nos crea un flujo de aire a contra corriente, impidiendo que el aire circule limpio y reduciendo la fuerza generada por los alerones.

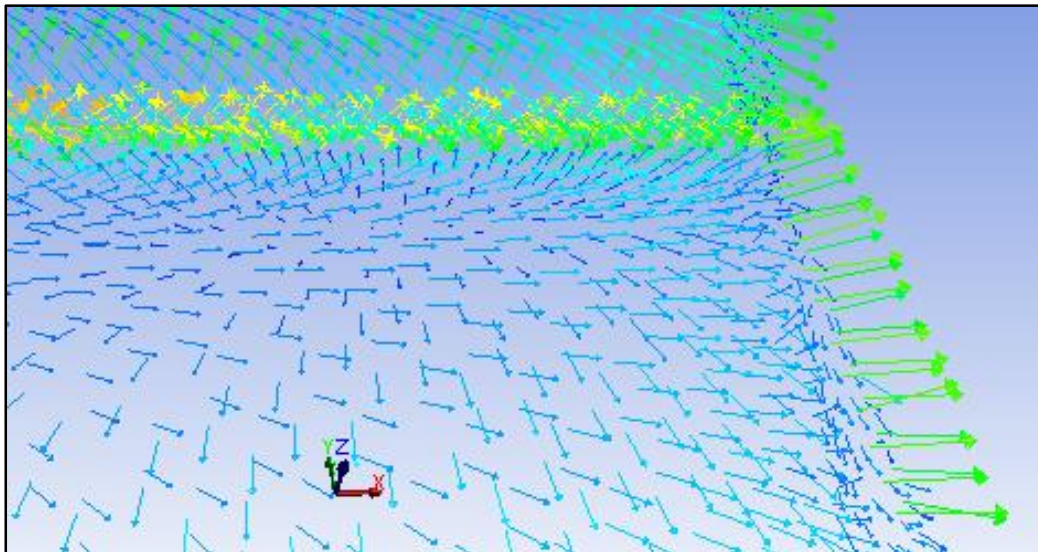


Ilustración 135: Imagen ampliada del salto sobre el borde de parte del fluido

En la imagen se puede apreciar, como en la parte derecha, (flechas verdes) el fluido bordea los raíles instalados perdiendo así parte del flujo del aire.

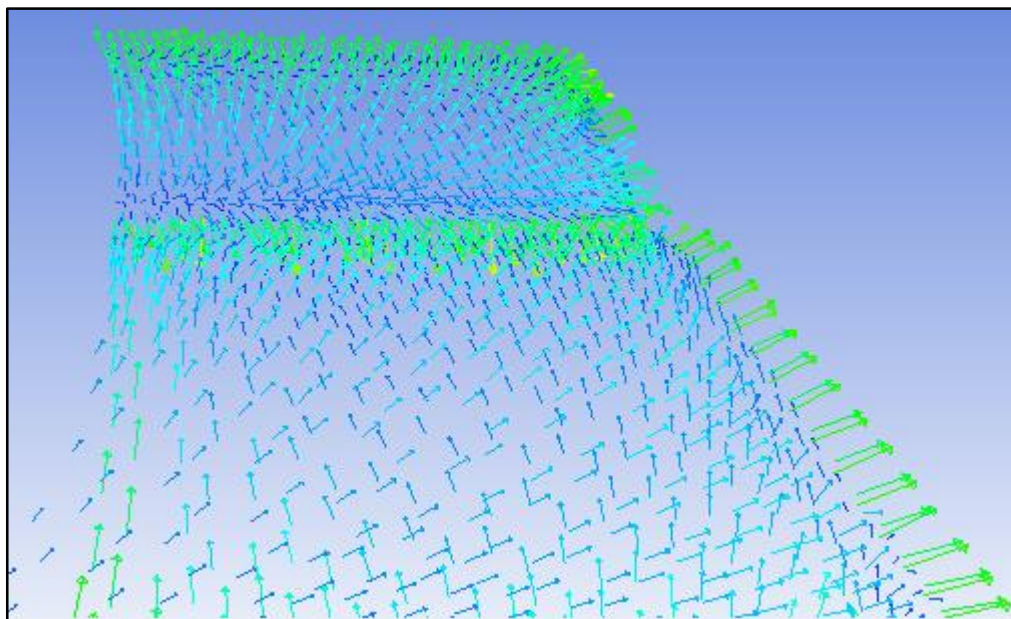


Ilustración 136: Flujo de aire alrededor del rail

Podemos ver en la ilustración 136 como el aire en la zona de la derecha (flechas azules) toma una tendencia ascendente canalizando el flujo de aire hacia el siguiente alerón, obteniendo una mejora del flujo y favoreciendo a contribuir a la fuerza de arrastre.

Analizaremos a continuación los vectores de velocidad en un plano perpendicular de los alerones en donde se puede apreciar bien las líneas generales del flujo y las zonas de turbulencia que se generan.

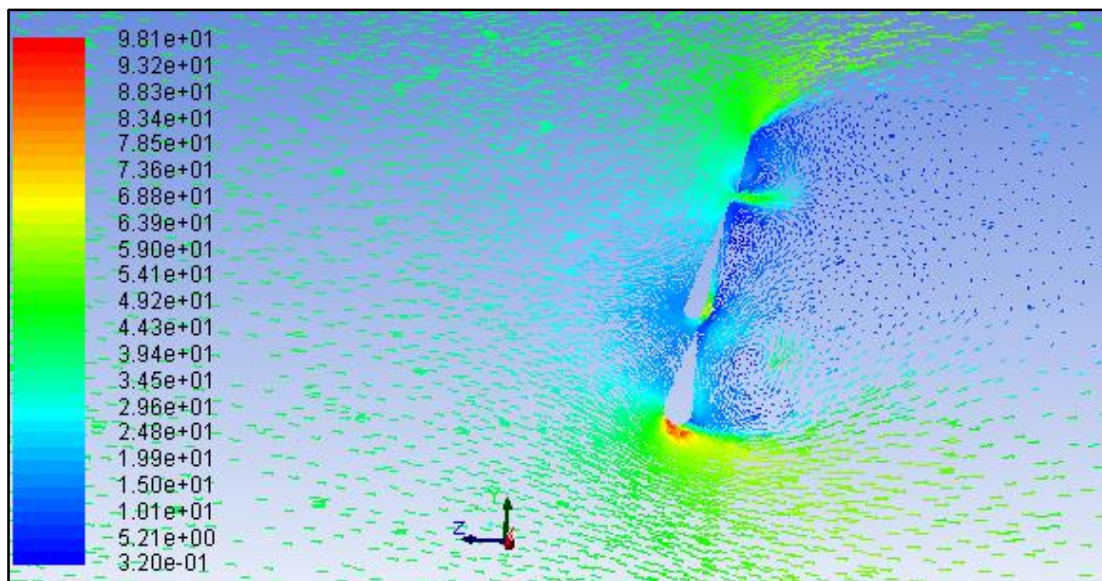


Ilustración 137: Plano perpendicular a los alerones donde se ven los vectores de velocidad

En la anterior ilustración podemos ver las zonas donde se genera la turbulencia y es posterior a los alerones, donde la capa límite después de estos se despega de una forma brusca contribuyendo a una gran resistencia aerodinámica. Podemos observar que existe una zona de pequeña turbulencia entre el primer alerón y el segundo. Esto lo mejoraremos en el siguiente diseño, donde colocaremos el segundo alerón por detrás del primero.

Además entre el segundo y tercer alerón debemos mejorar su posicionamiento porque puede observarse que el aire circula entre los alerones. En la siguiente imagen podemos ver lo anterior mencionado con mayor detalle.

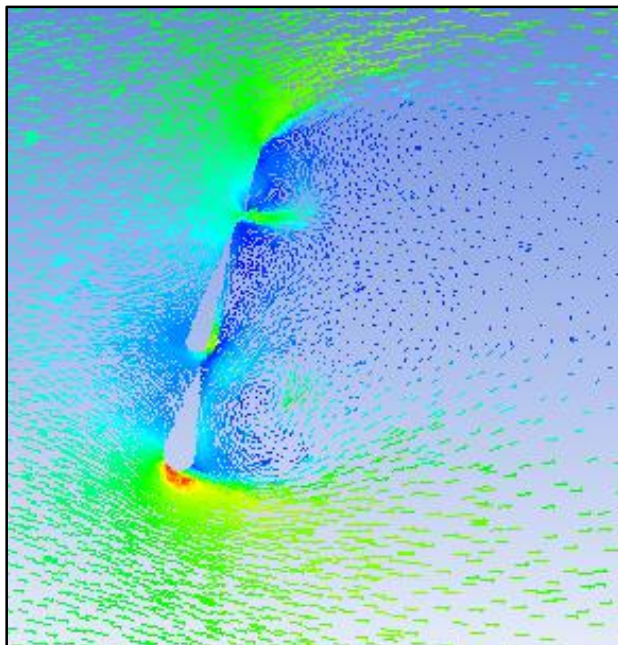


Ilustración 138: Plano detalle de vectores de velocidad

Incorporaremos además otras dos ilustraciones, una vista del plano perpendicular de las presiones y otra de las velocidades. Con ello se puede ver con mucho detalle, como se cumplen los fundamentos teóricos, en los cuales, las zonas donde se realiza la mayor resistencia al aire, (alerones) es la zona de mayor presión y la zona de menor velocidad, y debajo de los alerones, donde la presión es menor, la velocidad es máxima.

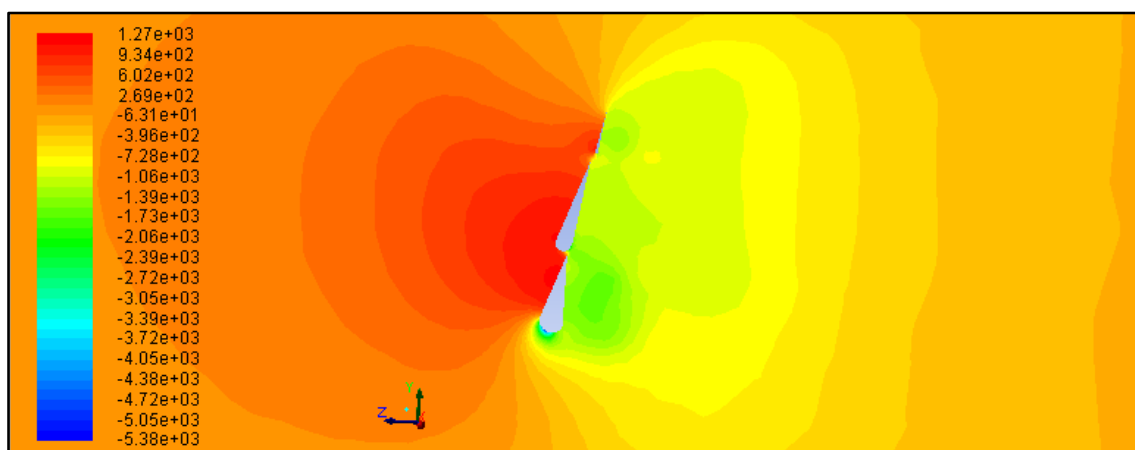


Ilustración 139: Mapa de presiones en los alerones por colores.

En la anterior ilustración podemos ver con mayor detalle, lo anterior mencionado pero además se va mejorar otro apartado para el siguiente diseño. En la imagen 139 se puede ver que en el primer alerón, existe en su borde de ataque

e inicio del alerón una zona con colores verdes y azules, (esto lo podemos ver con más detalle en la siguiente imagen 140) esto lo corregiremos en el siguiente modelo alargando hacia abajo el alerón y cambiándole el borde de ataque, para intentar conseguir una mejora en la fuerza de arrastre.

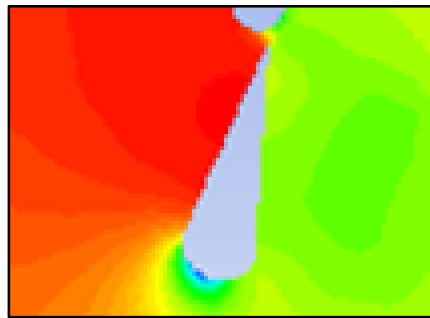


Ilustración 140: plano detalle del borde de ataque del primer alerón.

En la siguiente ilustración, podemos corroborar lo anteriormente mencionado del borde de ataque del primer alerón y el tránsito de aire entre el segundo y tercer alerón, que como se mencionó, se intentará mejorar en el siguiente modelo.

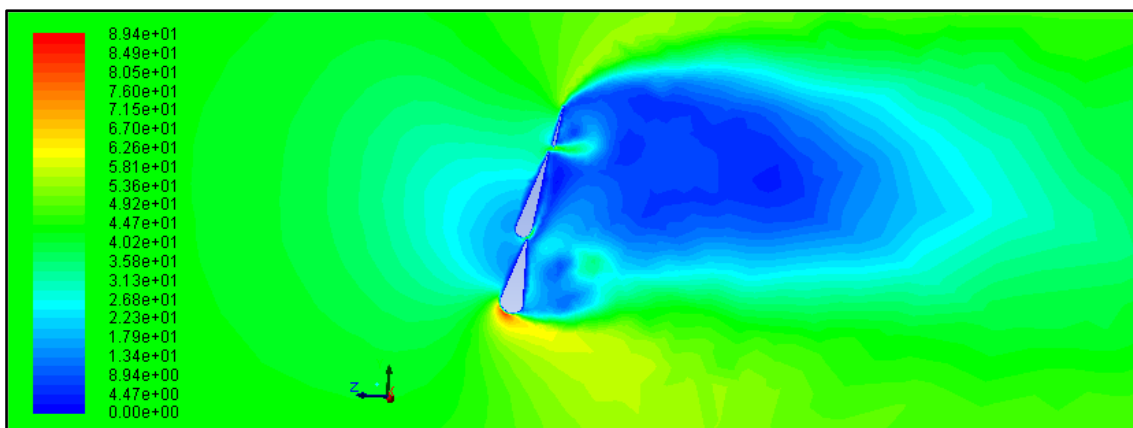


Ilustración 141: Gráfico de velocidades a lo largo de los alerones.

Podemos corroborar con este gráfico de velocidades, lo explicado anteriormente, y es que se puede apreciar en el gráfico como entre el segundo y tercer alerón, existe una zona de color verde entre una gran zona azul, eso se explica que una parte de aire, no circula hacia el tercer alerón, sino a través de ellos, reduciendo la fuerza de frenada. También podemos ver como las velocidades en el borde de ataque

del primer alerón son muy elevadas. Todo esto lo podemos ver en la siguiente ilustración con más detalle.

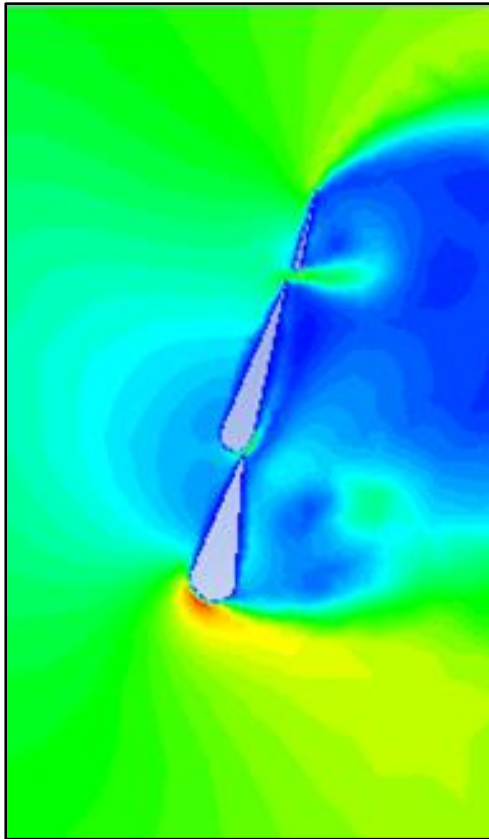


Ilustración 142: Plano detalle de velocidades

Analizados todos los parámetros, podemos ver que con la incorporación de los raíles, se ha conseguido una mejora en la fuerza de resistencia, hemos mejorado de 31.7 N a 32.0 N, una mejora de 0,3 N únicamente incorporando estos raíles de únicamente dos milímetros de alto. Por lo tanto, consideramos los raíles una mejora real y, a partir de ahora, los modelos simulados seguirán incorporando los raíles, ya que con estos se corrige en gran medida las turbulencias que se producían en la parte delantera de los alerones.

Otra conclusión que podemos obtener de la simulación de este modelo, son los parámetros a corregir para los siguientes modelos, como mencionamos, en el diseño del nuevo modelo, se cambiará el borde de ataque del primer alerón, y la geometría entre el segundo y tercer alerón para la búsqueda de un modelo más eficiente.

6.2.6 RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO 4

Este modelo, es el seleccionado para implantarlo en la motocicleta, ya que es una evolución final de todos los anteriores, y corrige en gran medida, todos los problemas encontrados en los anteriores diseños. Se han cambiado los perfiles, los bordes de ataque, los ángulos y también la disposición de las canaladuras, todo ello para obtener una mayor fuerza de resistencia al aire.

6.2.6.1 Valores de los perfiles

- Primer perfil:

Perfil asimétrico

Borde de ataque: 6mm

Ángulo de ataque: 77 grados.

Cuerda 64 mm

Espesor: 14.06%

Distribución del espesor: 2.63%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%

Posición de la ordenada máxima: 50%



Ilustración 143: Primer perfil del modelo 4

- Segundo perfil:

Perfil asimétrico

Borde de ataque: 3,5 mm

Ángulo de ataque: 83 grados.

Cuerda 53 mm

Espesor: 9.56%

Distribución del espesor: 2.83%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%

Posición de la ordenada máxima: 50%



Ilustración 144: segundo perfil del modelo 4

-Tercer perfil:

Perfil simétrico

Borde de ataque: 2 mm

Ángulo de ataque: 80 grados.

Cuerda 26 mm

Espesor: 16,8%

Distribución del espesor: 50%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 0%

Posición de la ordenada máxima: 0%

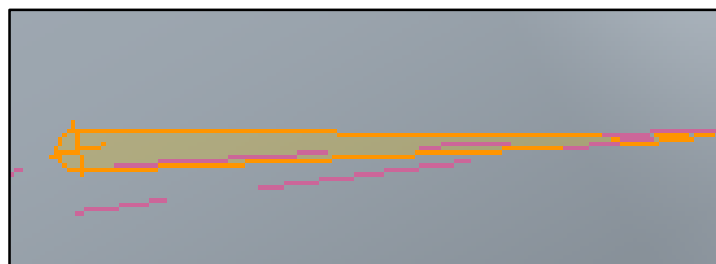


Ilustración 145: Segundo perfil del modelo 4

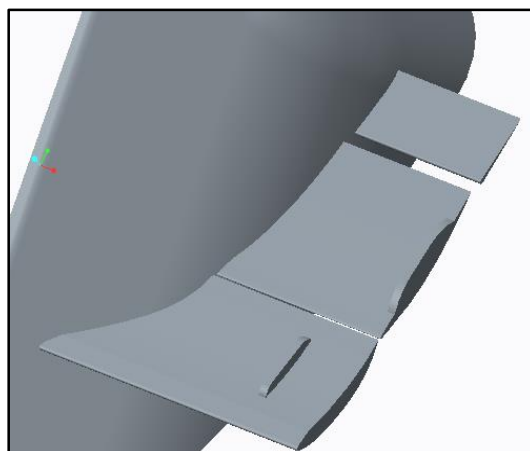


Ilustración 146: Alerones modelo 4

6.2.6.2 Cálculo del número de Reynolds

A continuación, calcularemos el número de Reynolds para este diseño, como se comentó con anterioridad.

Conocemos los parámetros del número de Reynolds:

$$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$V = 44 \text{ m/s}$$

$$L = 0,07 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,07 \text{ m}}{1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2} = 212831.46 \rightarrow 10^4 < Re < 10^6$$

Como hemos visto anteriormente, nos encontramos en la región turbulenta con moderada dependencia del número de Reynolds.

6.2.6.3 Resultado del modelo simulado 4

Lo primero que se comentará que este modelo, llegó a converger en la iteración 999, y como podemos observar en el gráfico, los valores de los residuos están por debajo de 10^{-3} , por lo tanto, damos los resultados por válidos.

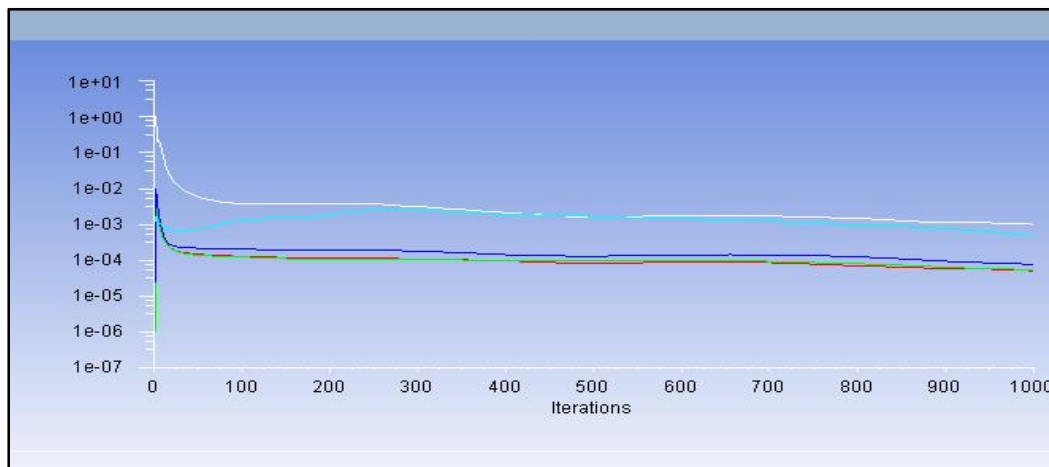


Ilustración 147: Escala de residuos

Los siguientes valores que analizaremos, son los valores de los coeficientes de sustentación y de resistencia aportados por el programa, que son, para el coeficiente de resistencia, $c_d = 1.5549$ y para el valor de sustentación, 4.926×10^{-4} .

Si comparamos el valor del C_d del programa con el teórico, obtenemos un valor de este último de 3.099, es cierto que los valores no son próximos, pero son de la misma magnitud, y por tanto, son válidos los resultados, ya que los cálculos teóricos, la ecuación elimina parámetros y no se realizan los cálculos con todos los decimales.

Los valores del programa los podemos ver en la siguiente ilustración:

$C_d - 1$
-1.5578e+00
-1.5575e+00
-1.5572e+00
-1.5567e+00
-1.5562e+00
-1.5559e+00
-1.5555e+00
-1.5552e+00

Ilustración 148: Valores c_d aportados por el programa

Analizados los valores de los coeficientes, analizaremos los valores de las fuerzas de arrastre aportados por el programa, que obtenemos un valor de 17.51 N que si lo aplicamos a todo los alerones, es de 35.02N, un valor muy por encima de los anteriores modelos, y un valor importante, y por este motivo, lo seleccionaremos como el modelo para implementar en la motocicleta.

El valor de esta fuerza, lo podemos ver en la siguiente ilustración.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
alerones	Pressure	Viscous	Total
	-17.512149	-0.0013085633	-17.513458

Net	-17.512149	-0.0013085633	-17.513458

Ilustración 149: Valores de las fuerzas aportados por el programa

Analizaremos también la fuerza de sustentación que ofrecen estos alerones, que en este caso, el signo negativo indica sustentación negativa. En la siguiente imagen podemos ver los valores de esta fuerza, que como podemos comprobar es muy baja.

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
Zone	Forces (n)		
alerones	Pressure	Viscous	Total
	-6.7427195	-0.0086792256	-6.7513988

Net	-6.7427195	-0.0086792256	-6.7513988

Ilustración 150: Fuerzas de sustentación aportadas por el programa

Analizaremos ahora, como el aire ejercer presión sobre los alerones, como se explicó en los anteriores modelos, en la superficie de los alerones la presión es máxima y por la parte posterior es mínima. Colores cercanos al rojo indica que las presiones son elevadas, y podemos ver los colores de estos alerones lo que nos da a entender los motivos de la elevada fuerza de arrastre.

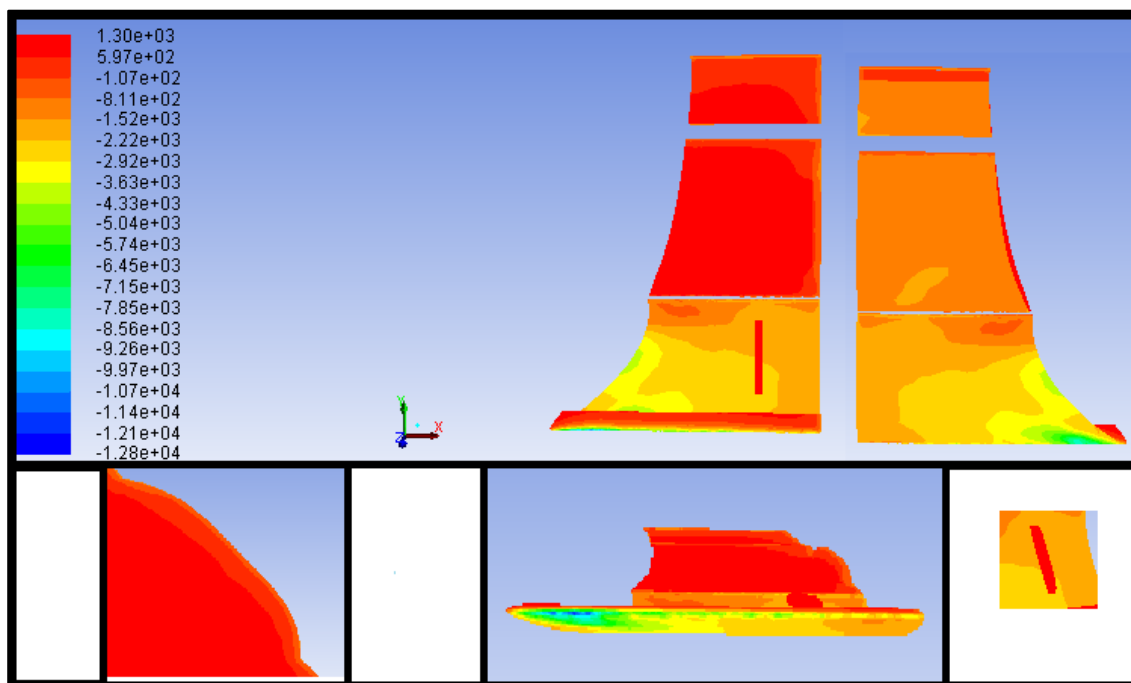


Ilustración 151: Valores de las presiones sobre los alerones

Como se puede ver, la imagen de la izquierda es el alerón visto de frente, el de la derecha la parte posterior de los alerones, y abajo, de izquierda a derecha, están las canaladuras del segundo alerón, el borde de ataque del primer alerón y la canaladura del primer alerón.

Analizadas las presiones, continuaremos con los vectores de velocidad para poder ver las direcciones que sigue el fluido en su paso por los alerones.

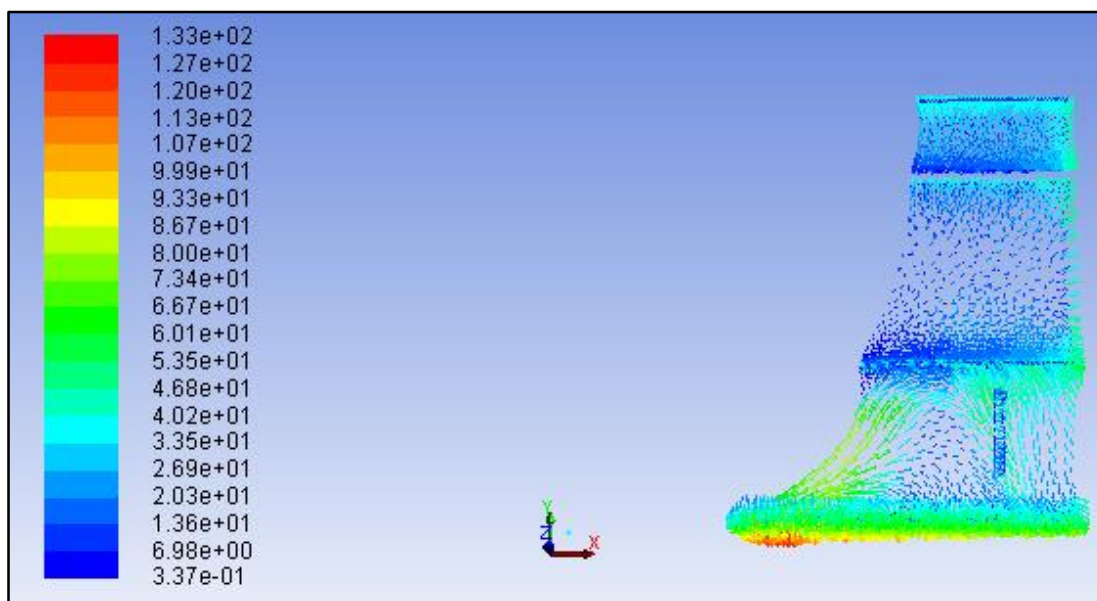


Ilustración 152: valores de los vectores de velocidad

En la imagen, podemos observar, que existen bajas velocidades del aire a lo largo de los alerones, además podemos ver como los raíles ayudan a que el flujo de aire siga una tendencia ascendente. Podemos comprobar además que en la zona de la izquierda, nos encontramos con el problema del modelo anterior, y es que existe un rebote del aire por parte del guardabarros, este problema se solucionará realizando un guardabarros con líneas más suaves, y con ello, conseguiremos aún mejores velocidades de arrastre.

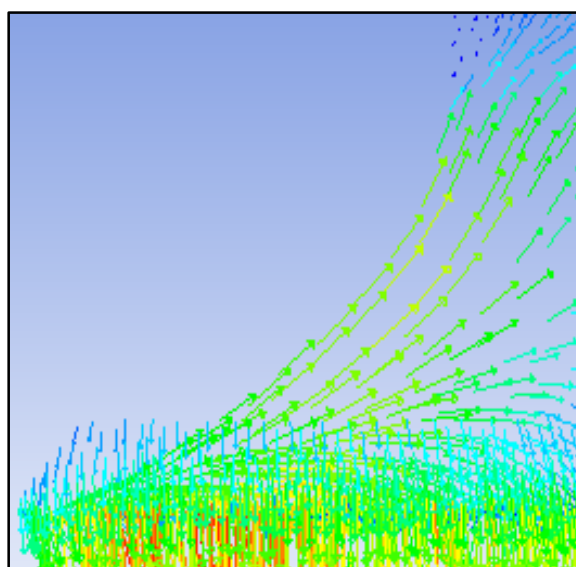


Ilustración 153: Plano detalle del rebote del guardabarros

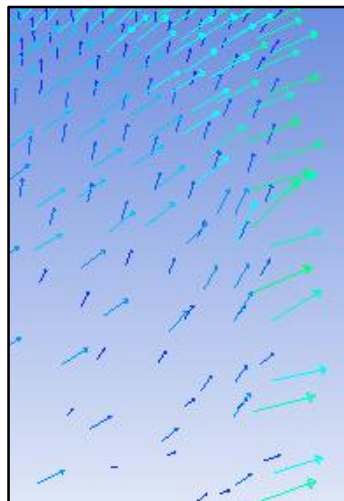


Ilustración 154: Plano detalle del flujo alrededor de la canaladura

Analizado todo lo anterior, ahora a través de las siguientes ilustraciones visualizaremos con un plano perpendicular a los alerones, como fluye el fluido, tanto las velocidades como las líneas de acción a través de los alerones. Donde podemos ver que se reducen las turbulencias tras los alerones y también en estos. Además se ven las grandes zonas de presión que realiza el aire a su paso.

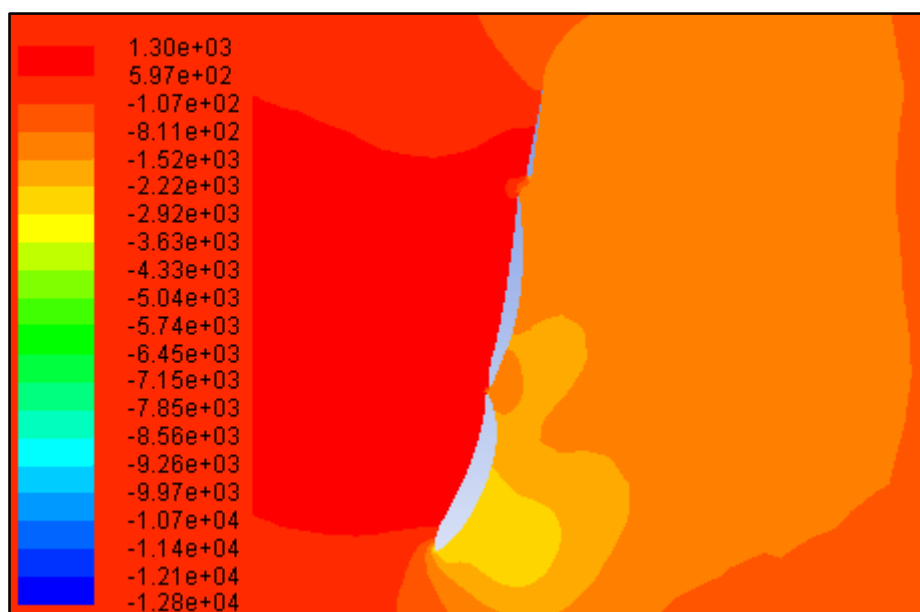


Ilustración 155: Presiones en un plano perpendicular a los alerones

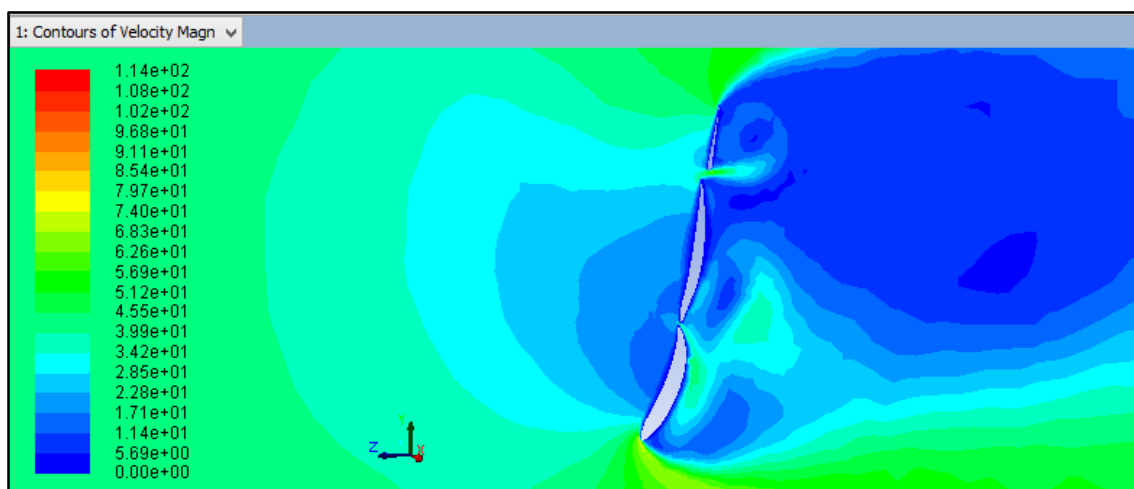


Ilustración 156: Velocidades en un plano paralelo a los alerones

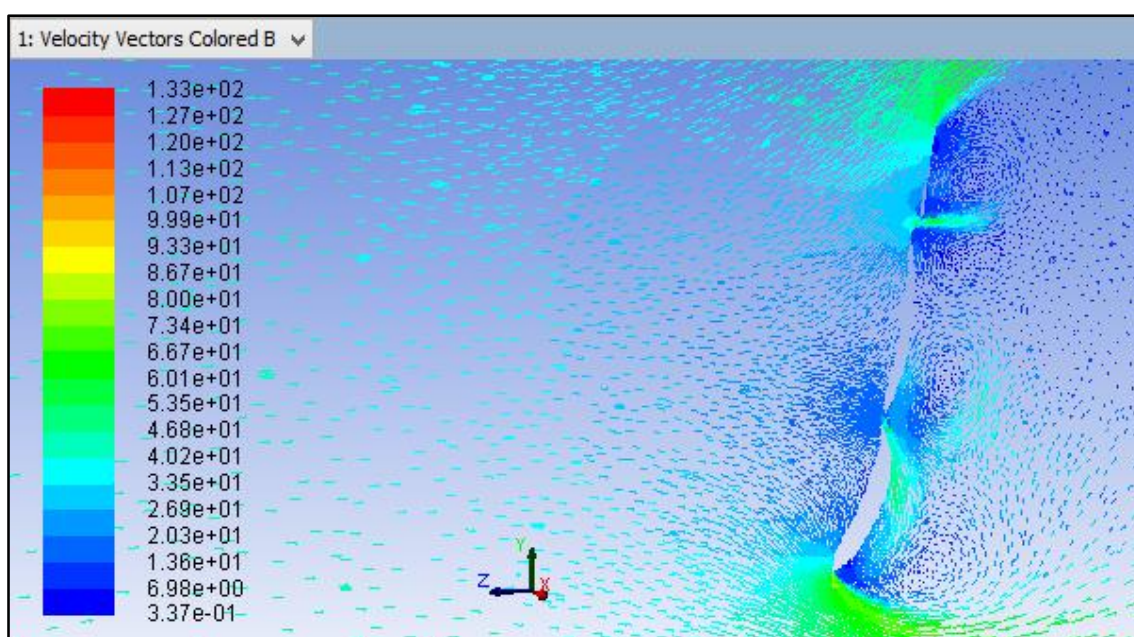


Ilustración 157: vectores de velocidad en un plano perpendicular a los alerones

Una vez, analizado todos los datos, podemos ver que se ha conseguido una mejora notable en las fuerzas de arrastre, disminuyendo además la turbulencia en los alerones y la turbulencia tras estos. Es cierto, que se ha reducido considerablemente, pero siempre existirá un porcentaje de fluido que atravesara entre los alerones, pero lo que se ha intentado es minimizar este tránsito de aire, obteniendo muy buenos resultados de fuerzas de arrastre.

6.3 Alerones fijos

Se va a realizar una simulación de unos alerones de geometría fija, es decir, están dispuestos en el guardabarros de forma permanente. Se realiza este tipo de simulación para realizar una comparación final de las ventajas entre utilizar alerones con geometría variable o fija. A continuación se expone los perfiles utilizados para este diseño.

6.3.1 Valores perfiles

-Perfil primer alerón:

Borde de ataque: 10mm

Cuerda: 80mm

Espesor: 16,12%

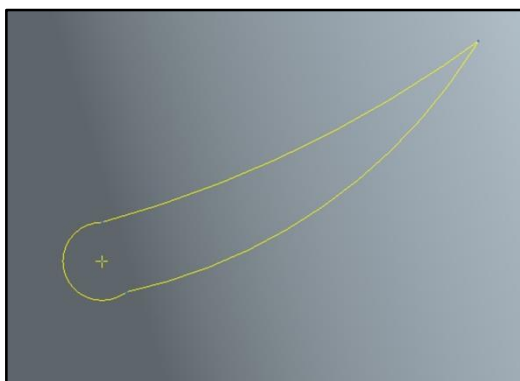
Distribución del espesor: 22,7%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media: 7,97%

Posición de la ordenada máxima: 49,18%

Ángulo de ataque: 28°

Perfil asimétrico.



**Ilustración 158: Perfil del primer alerón del
modelo geometría fija**

- Perfil segundo alerón

Borde de ataque: 6 mm

Cuerda: 60mm

Espesor: 16,7%

Distribución del espesor:16,92%

Ordenada máxima de la línea de curvatura media:2,73%

Posición de la ordenada máxima:50%

Ángulo de ataque: 28°

Perfil asimétrico.

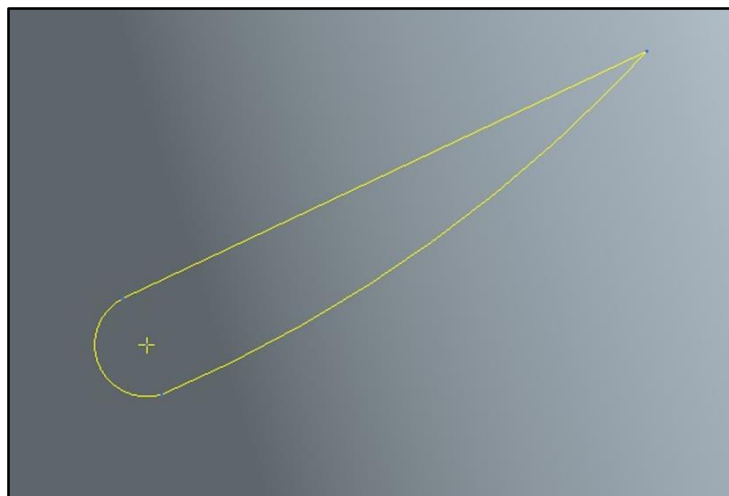
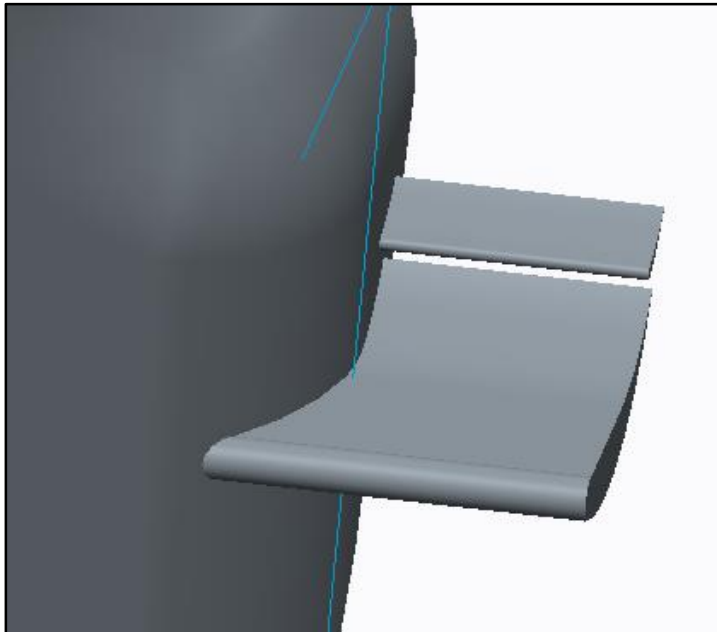


Ilustración 159: Perfil del segundo alerón del modelo de geometría fija.

Una vez explicados los perfiles, en la siguiente imagen podemos ver el resultado final de los alerones dispuestos en el guardabarros.



**Ilustración 160: Alerones del
modelo de geometría fija**

6.3.2. Cálculo del número de Reynolds

A continuación, calcularemos el número de Reynolds para este diseño, como se comentó con anterioridad.

Conocemos los parámetros del número de Reynolds:

$$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$V = 44 \text{ m/s}$$

$$L = 0,06 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 44 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,06 \text{ m}}{1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2} = 182426.996 \rightarrow 10^4 < Re < 10^6$$

Como hemos visto anteriormente, nos encontramos en la región turbulenta con moderada dependencia del número de Reynolds.

6.3.3 Resultados

Una vez, que se dispone del diseño CAD de los alerones, se realizará la simulación y se comenzará a comentar los resultados del análisis. Podemos ver que ha sido necesario 1477 iteraciones para que converjan y en la siguiente gráfica (ilustración 161) se puede observar que los residuos están por debajo de 10^{-3} por lo tanto los datos conseguidos son válidos.

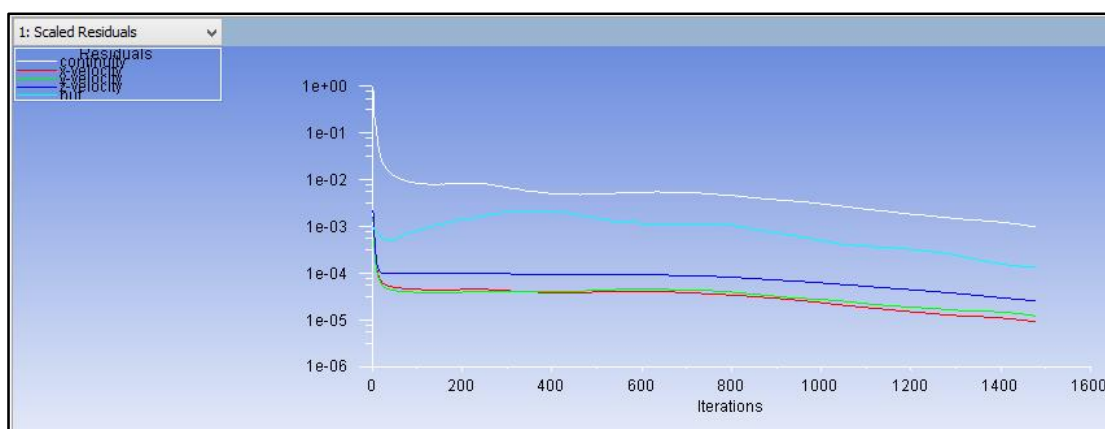


Ilustración 161: Gráfica de los residuos e iteraciones

El coeficiente drag aportado (imagen 162) por el programa es de 7.39×10^{-3} , el cálculo obtenido de forma manual, teniendo en cuenta, el área que es de 0.0030 m^2 es de 3.44×10^{-3} por tanto, valores muy pequeños, en comparación con los obtenidos de los modelos de geometría variable.

Cd-1
7.3905e-03
7.3909e-03
7.3912e-03

Ilustración 162: Valores de Cd ofrecidos por el programa

Las fuerzas drag que obtenemos en el programa son de 6.2439 N, que teniendo en cuenta la simetría, el valor total de la fuerza es de 12.48N, como podemos ver el valor está muy por debajo de los modelos de geometría variable.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
alerón	-6.1672709	-0.076643101	-6.243914

Net	-6.1672709	-0.076643101	-6.243914

Ilustración 163: Valores d las fuerzas de arrastre dados por el programa

Con respecto a las fuerzas lift, que hacen que el neumático se adhiera con más fuerza al suelo, obtenemos valores más elevados que con los de geometría variable. Los valores que se consiguen son de 10.77 N, ofreciendo un valor final de 21.54N.

Forces - Direction Vector (0 1 0)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
alerón	-10.816854	0.039300898	-10.777553

Net	-10.816854	0.039300898	-10.777553

Ilustración 164: Valor de fuerza lift que se obtiene del programa.

Analizamos las fuerzas de presión a través de la superficie de los alerones, para saber qué zonas contribuyen más a la fuerza de arrastre y cuales menos. En la siguiente ilustración 165, la primera imagen corresponde a un plano de vista frontal, el de la derecha es un plano de vista trasero y el de abajo es un plano detalle de los bordes de ataque. Podemos comprobar, que la superficie superior es la zona de mayor presión, pero no alcanza en su mayoría de superficie valores de color rojo, esto conlleva que las fuerzas de arrastre sean bajas, también en la zona de la derecha, podemos ver zonas de color verde, por lo tanto, está zona contribuye demasiado poco a la fuerza de arrastre.

La primera imagen corresponde a un plano de vista frontal, el de la derecha es un plano de vista trasero y el de abajo es un plano detalle de los bordes de ataque. Desde la vista trasera, podemos ver que las presiones que se ejercen son bastante bajas, que coincide con las zonas de mayor velocidad, y contribuyendo a lo que queremos lograr.

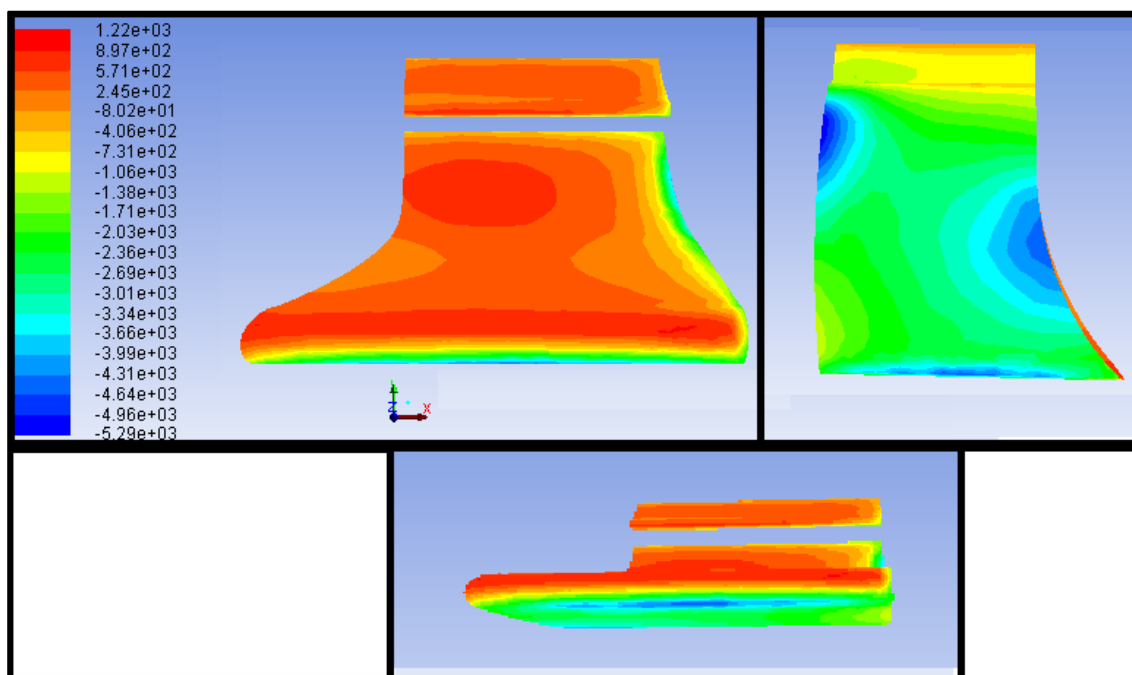


Ilustración 165: Imágenes de las presiones sobre los alerones

El siguiente análisis se realizará visualizando los vectores de velocidad sobre los alerones, para poder ver cómo transcurre el flujo de aire a través de los alerones.

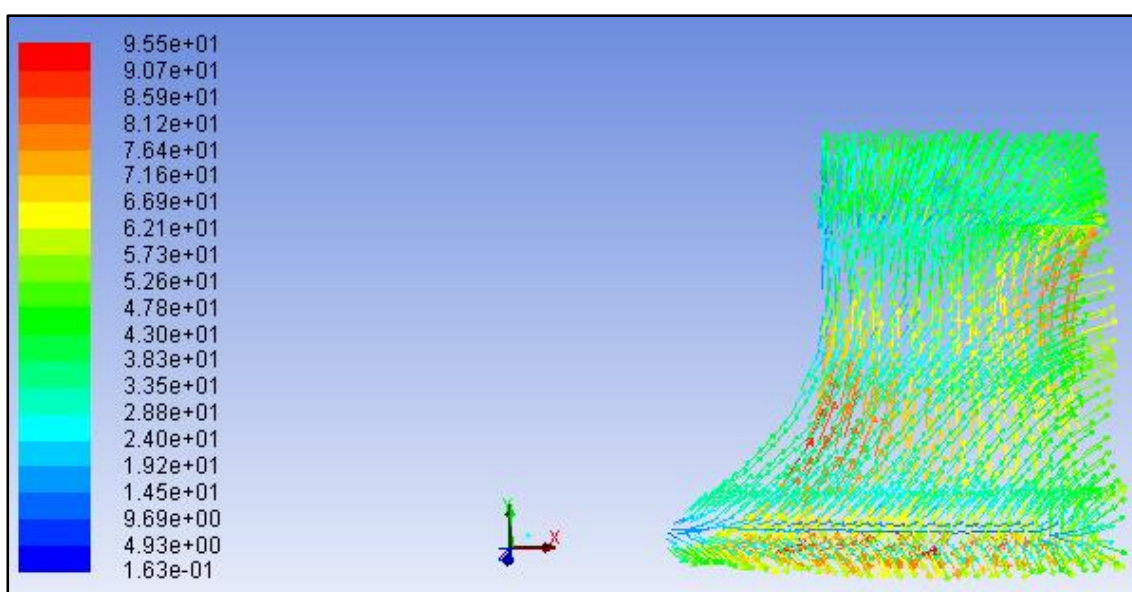
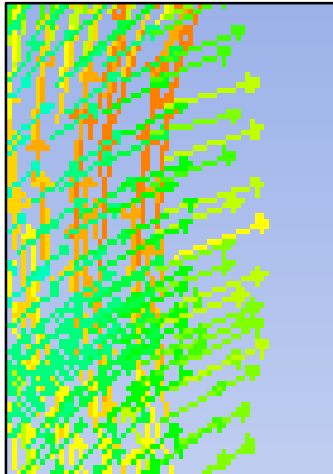


Ilustración 166: Gráfico de vectores de velocidad

Podemos comprobar, que el flujo fluye de forma bastante optima de forma ascendente del primer alerón al segundo, además no existe grandes zonas de turbulencia sobre los alerones pero si encontramos el mismo problema que los modelos anteriores de geometría variable, y es que el fluido se desplaza hacia la derecha saliendo fuera del alerón y no contribuyendo a la fuerza de resistencia.



En la siguiente imagen podemos ver en detalle como el aire sale fuera de los alerones, reduciendo la eficiencia de los alerones.

Ilustración 167: Plano detalle de los vectores de velocidad

A continuación se muestra un plano perpendicular para ver con mayor detalle las presiones alrededor de los alerones, donde podemos visualizar las zonas donde más resistencia aerodinámica se hace y es en las zonas de color naranja oscuro, pero podemos ver que estos valores no llegan a ser muy elevados ya que no alcanzan el color rojo. Las zonas de menor presión son aquellas que quedan tras los alerones y coincide con las zonas de mayor velocidad y de mayor turbulencia.

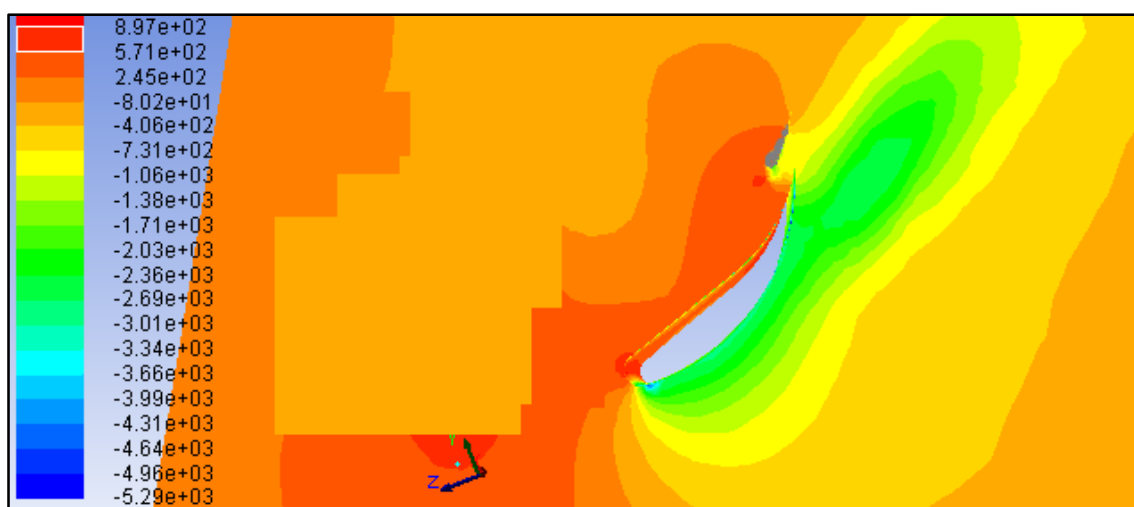


Ilustración 168: Plano perpendicular a los alerones gráfico de presiones

Se añadirá además otra ilustración de un plano perpendicular a los alerones, pero en este caso, es de las velocidades del aire a lo largo de los alerones, donde las zonas de menor velocidad son las de mayor presión, y las zonas de menor presión son las de mayor velocidad, además se aprecia que las velocidades delante de los alerones son relativamente constantes, por tanto, no existe zonas de turbulencia en gran medida.

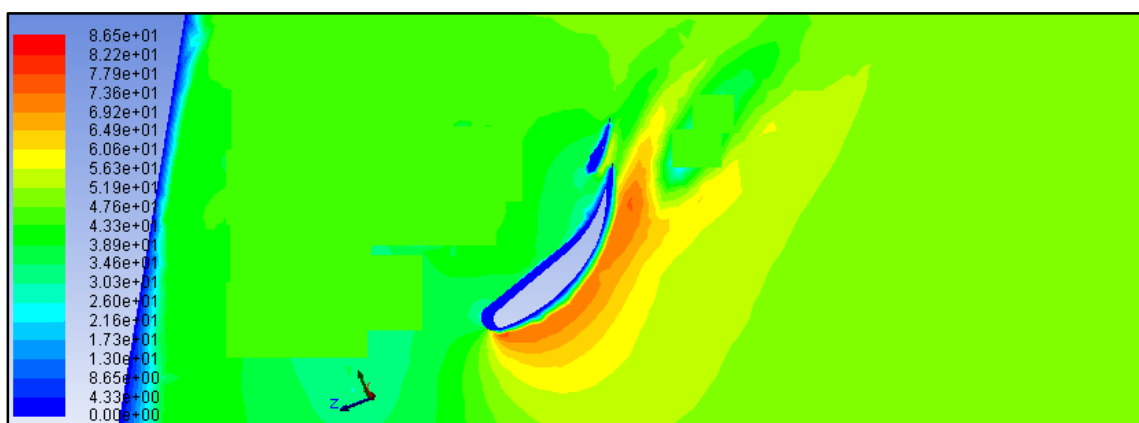


Ilustración 169: Plano perpendicular a los alerones gráfico de velocidades

Analizados todos los datos, podemos concluir, que unos alerones fijos en el guardabarros, conlleva una gran complejidad, ya que hay que conseguir un equilibrio entre la fuerza de arrastre que asiste a la frenada, y la velocidad que se pierde por dicha fuerza.



Por tanto, hay que conseguir una mayor fuerza de sustentación negativa, que ayude a que el neumático se agarre más al suelo y poder hacer una frenada más fuerte. El problema, reside, que no se pueden alcanzar grandes fuerzas de arrastre, ya que perjudicaría más que contribuye a reducir tiempos, como consecuencia que las fuerzas de arrastre también frenan al vehículo en recta, en motos de cilindrada tan pequeña como la Moto 3. Otro problema, es que al tener una fuerza de sustentación negativa considerable, la degradación del neumático es más elevada.



CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE LAS CONCLUSIONES

En este capítulo se expondrá un análisis en conjunto de todos los resultados, y los motivos por los cuales se elige un modelo. Además se realizará un análisis de cuánto tiempo se gana en una frenada con los alerones implementados en la motocicleta. Para finalizar, se hará una valoración final de lo que ha sido la elaboración de este proyecto.

En este modelo se exponen cinco modelos simulados, el primero, un modelo excesivamente simple el cuál fue el punto de partida, era demasiado simple y poco efectivo como para poder considerar sus resultados, ya que los valores de fuerza de arrastre eran prácticamente despreciables comparadas con la fuerza de frenada que realizan los frenos.

El segundo modelo, mucho más complejo, basándose en frenos de aeronaves, se obtenía de él valores aceptables para ser implementados en la motocicleta. La fuerza de arrastre de 31,7 Newton, que son 3,17 kilos y si estos valores los comparamos por ejemplo con un alerón trasero de un formula 1 el cual ejerce unos 50 kilos de fuerza, podemos dar los resultados por bastante buenos.

Analizando los resultados en Fluent, se pudo apreciar varios problemas como se explica anteriormente. Los problemas de este modelo, eran que se generaba turbulencia en la superficie de los alerones, y que excesivo flujo de aire se desviaba hacia la derecha de los alerones y no se utilizaban para generar fuerza de arrastre. Se decidió para corregir estos problemas, la creación de unos carriles para canalizar el flujo de aire. Por tanto, se realizaron sucesivos modelos hasta alcanzar el modelo tres, como se observa en la memoria, con unas canaladuras de pequeño tamaño para eliminar este problema.

En el tercer modelo, ya con canaladuras, se observa, que los problemas de turbulencia en la superficie de los alerones se han reducido en gran medida, y que se consigue canalizar más aire, a más velocidad y por tanto mejorando los resultados, donde la fuerza de arrastre que se obtiene, es de 32.1 N, una mejora de 0,4 N únicamente con las canaladuras de altura 2 mm. Hay que añadir, que en ambos modelos, en el anterior y este modelo, existe un pronto despegue de la capa límite provocado por los muy elevados ángulos de ataque de los alerones, creando grandes zonas turbulentas detrás de los alerones y elevados coeficientes drag, que es lo que se quiere conseguir.

Aun así, este modelo, se podía seguir mejorando, ya que se encontró zonas deficientes del modelo, ya que un porcentaje considerable de aire, circulaba entre los alerones, sin ejercer la resistencia al paso.

También se encontró problemas con el primer perfil, el cual no era todo lo eficiente que necesitábamos. Se decidió seguir mejorando y se crearon modelos sucesivos intentando corregir los defectos anteriores, hasta llegar al modelo simulado cuatro.

En el cuarto modelo y modelo final, se crearon perfiles distintos, se crearon perfiles asimétricos, reduciendo el ángulo de ataque del primer alerón, y aumentando el del segundo alerón. Además se colocaron los alerones más próximos entre sí y a la misma altura, para canalizar todo el flujo de aire. En los diversos modelos hasta este final, se apreció que colocar canaladuras en el tercer alerón, no apartaba nada a tener en cuenta, por tanto, se decidió suprimirlo para ahorrar peso y costes de construcción.

Las canaladuras, se han aumentado de tamaño, hasta los 3 mm y en el primer alerón, el raíl se dispuso en el centro del alerón y no en final, ya que en este lugar, aportaba mejores resultados. Con respecto a los perfiles, estos se suavizaron, se pasó de usar líneas rectas a realizar líneas curvas, que contribuyan a que el flujo no se desprende en esta zona y los bordes de ataque se suavizaron y son de menor tamaño. Todos estos parámetros en los diferentes modelos se fueron modificando, hasta llegar a este último modelo cuatro, en el cual se consigue una fuerza de arrastre de 35.02 N. Una mejora sustancial con respecto al modelo dos, en el cual se ha mejorado en 3.32 N y con respecto al modelo tres que la mejora es de 2.92 N. Por tanto, con este modelo conseguimos 3,5 kilos de fuerza, casi medio quilo más con respecto al modelo dos, ya que el primer modelo, por su simpleza, no lo tenemos en cuenta para los resultados. Además de esta mejora de la fuerza, se ha conseguido minimizar la turbulencia en la superficie de los alerones y minimizar esta tras los alerones con respecto a los modelos anteriores. Con lo cual, consideramos este modelo, como el mejor para la implementación en la motocicleta.

Realizaremos además, un estudio teórico de la mejora que supone este guardabarros y lo que contribuye a la frenada como podemos ver a continuación. Se han buscado valores de fuerza de frenada de motocicletas, pero al ser competición, son valores bastante secretos y difíciles de encontrar, por tanto, utilizaremos una aproximación con respecto a una motocicleta de calle cuya fuerza de frenado es de 8,7 m/s². Para realizar el cálculo de la aceleración negativa que aportan los alerones, utilizaremos la formula (1). Donde F, es la fuerza de arrastre que es de 35.02 N, la masa, la supondremos y será de 180 kilos incluyendo al piloto, y la fuerza es lo que queremos obtener, realizando los cálculos que se disponen a continuación:

$$F = m * a \quad (1) \text{ despejamos esta fórmula;}$$
$$a = \frac{F}{m}; \text{ donde } F = 35.02N \text{ y } m = 180 \text{ kilos } (2)$$

Obtenemos que a es, $a = \frac{35.02}{180}$ es de 0.1945 m/sg^2

Con el valor de la aceleración negativa conseguida, (0.1945 m/sg^2) ahora debemos realizar otro cálculo, supondremos que la velocidad de llegada en la frenada es de 44 m/sg que es la velocidad en la que se han realizado las simulaciones, y la velocidad de entrada a la curva, es de 16.66 m/sg .

Por tanto, utilizaremos las fórmulas de los movimientos rectilíneos uniformemente acelerados (MRUA(3)), ya que despreciamos las variaciones de fuerza arrastre, las variaciones del firme, las variaciones de temperatura y desgaste de neumáticos que todos ellos, complicarían en gran medida los cálculos:

$$v_f = v_o - at^2$$

, donde la velocidad final, (v_f) es 16.66 m/sg , la velocidad inicial (v_o), de 44 m/sg y la aceleración (a) es la suma de aceleración de los frenos y de los alerones ($0.1945+8.07$) m/sg^2

Despejamos el tiempo y obtenemos la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\frac{v_o - v_f}{a}} = \sqrt{\frac{(44 - 16.6)}{(0.1945 + 8.7)}} = 1.7532 \text{ sg}$$

Concluimos, que la frenada con los alerones, se realiza en 1.7532 sg , ahora realizaremos los mismos cálculos, pero sin incluir la aceleración de los alerones.

$$\sqrt{\frac{v_o - v_f}{a}} = \sqrt{\frac{(44 - 16.6)}{(8.7)}} = 1.7727 \text{ sg}$$

Por tanto, si restamos ambos tiempos, obtenemos el tiempo que reducimos en la frenada, que es,

$$1.7727 - 1.7532 \text{ sg} = 0.0195 \text{ sg}.$$

Esto quiere decir, que para una frenada relativamente importante, mejoramos aproximadamente, dos centésimas que si tenemos en cuenta, que un circuito tiene del orden de 17 curvas, y frenar fuerte por ejemplo, en 12 curvas, obtenemos una mejora total por vuelta de 0.234 sg , es decir, algo más de dos décimas, y si este tiempo, lo prolongamos en una carrera, por ejemplo como las del mundial, de 22 vueltas,



obtenemos una ventaja de 5.148 sg, que es una ventaja bastante importante con respecto a rivales sin los alerones.

Podemos concluir, que la incorporación de los alerones, si mejorar los tiempos de una motocicleta de competición, y sin ser valores, extremadamente buenos, podemos obtener mejoras que hagan mejorar el tiempo por vuelta, y ello conllevar a ganar carreras y clasificaciones.

Una vez que tenemos claro, el modelo seleccionado, y las ventajas que este nos ofrece, podemos realizar una comparación entre los alerones de geometría variable con respecto a los de geometría fija.

Podemos comprobar, que el modelo variable, ofrece una fuerza de 35,02 N y el de geometría fija de 12.48 N, esto quiere decir que los alerones de geometría variable obtienen una mejora de 22.52N , que es un valor bastante importante, además del problema, que en recta, el modelo fijo está generando una resistencia aerodinámica que genera una pérdida de varios kilómetros por hora menos de velocidad punto, conllevando una pérdida de tiempo por vuelta, por tanto, concluimos, que descartamos el uso de alerones de geometría fija frente a los de geometría variable, ya que estos últimos aportan una mejora mucho mayor ya que realizan una mayor fuerza de resistencia además en recta, al no estar , no conllevan una reducción de la velocidad.



CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

El trabajo fin de grado profundiza en el mundo de las motocicletas desde un punto de vista técnico, desarrollando unos alerones que contribuyan a la frenada. Lo difícil que puede ser optimizar cualquier componente cuando estas restringido por una reglamentación y además trabajas en un equipo con diferentes departamentos, que deben compaginarse y trabajar en armonía como uno solo.

En este trabajo, se consigue cumplir el objetivo principal, que es una propuesta de diseño de unos alerones con geometría variable para favorecer en la frenada y reducir los tiempos por vuelta según las especificaciones requeridas en la competición Motostudent.

La propuesta de diseño de los alerones, está basado en una metodología personal, en el que se sugieren una serie de factores que se consideran los más apropiados para las especificaciones que requiere el conjunto de una motocicleta.

Se proponen varios diseños, analizando todos ellos ante una misma velocidad de flujo de aire simulando su despliegue justo en la frenada, obteniendo la reducción de tiempo en la frenada y la fuerza de arrastre como el coeficiente de arrastre.

Finalmente, se selecciona un modelo debidamente justificada su selección en la cual conseguimos una elevada resistencia de frenada que nos proporciona una reducción de tiempos por vuelta de 0.234 sg y más de cinco segundos en una carrera, por tanto, se ha cumplido el objetivo principal que se planteó al inicio de este trabajo.



CAPÍTULO 9. TRABAJO FUTURO

El trabajo de diseño y cálculo de los alerones de geometría variable y su integración en una motocicleta de competición es extenso, y aunque en este trabajo se abordan muchos de los aspectos a valorar, creo que debe tener continuidad en otros proyectos futuros.

Este trabajo permite una evolución que considero necesaria para obtener un conjunto más competitivo y mejorar a lo que se he llegado en este trabajo.

En mi opinión, los pasos que se deberían seguir para continuar con la evolución o mejora de este proyecto englobaría los siguientes puntos:

- Optimizar el modelo rediseñando las geometrías de los alerones y de los raíles, además de un análisis de más ángulos de ataque.
- Realizar un estudio mediante parafina, toma y adquisición de datos en pista para comprobar los datos obtenidos en el programa.
- Análisis aerodinámico del conjunto de la motocicleta.

Fuera de este proyecto, y materia suficiente para otro proyecto, sería el análisis y creación del sistema mecánico, electrónico o hidráulico para llevar a cabo el movimiento de los alerones con geometría variable, para que en recta estén ocultos y en frenada se desplieguen.



CAPÍTULO 10. PRESUPUESTO

Se expone a continuación un pequeño desglose de las actividades, equipos y personal que han sido utilizadas o han colaborado en la realización de este proyecto, detallándose con información económica y temporal, con objeto de ofrecer un presupuesto que pueda servir como indicador del coste del proyecto.

El desglose de costes se ha dividido en cuatro grupos:

- **Personal**: Estimación del coste de todo el personal que ha intervenido en el proyecto. En este caso, como autor del proyecto, Alejandro Berrocal Siguero, como Ingeniero.
- **Equipos**: Se estima la amortización del conjunto de equipos utilizados para la realización del proyecto: PC personal, y licencias de software Pro Engineer, ANSYS FLUENT y Office 2010.
- **Subcontratación**: Apartado en el que se desglosan todas las tareas que requieran de subcontratación a empresas externas. En este caso, todo ha sido realizado sin llevar a cabo esta práctica, por lo que no queda incluido.
- **Resto de costes indirectos**: Este apartado recoge los costes generales, dietas, viajes, materiales fungibles, imprenta...

La estimación de tiempo para la elaboración del proyecto es:

- Tiempo de desarrollo del proyecto: 6 meses
- Horas trabajadas/día: 4 horas
- Horas trabajadas/semana: 28 horas

Total horas empleadas en el proyecto: 720 horas



1. Autor

Alejandro Berrocal Siguero

2. Departamento:

Ingeniería Mecánica

3. Descripción del Proyecto:

- Título: Estudio de la influencia de los alerones en los parámetros mecánicos de una motocicleta de competición en frenada.
- Duración: 6 meses
- Costes indirectos: 15%

4. Presupuesto total del Proyecto:

17.230,00 euros

5. Desglose presupuestario

PERSONAL

Nombre y apellidos: Alejandro Berrocal Siguero

Tarea	Categoría	Dedicación	Coste (€/h)	Coste (€)
Modelado y simulación	Ingeniero grado mecánica	150	55,00	8.250,00
Documentación y redacción de la memoria		70	25,00	1.750,00
Supervisión	Ingeniero Superior	20	60,00	1.200,00
TOTAL				11.200,00

RECURSOS INFORMÁTICOS

Descripción	Coste (€)	% dedicado al Proyecto	Uso al Proyecto	Dedicación (Meses)	Periodo depreciación	Coste imputable (€)
Ordenador personal Intel i7	600,00	100,00		6	12	300,00
Licencia ProEngineer	5.400,00	80,00		5	12	1800,00
ANSYS FLUENT	6.500,00	80,00		6	12	2.600,00
Paquete Office 2013	800,00	70,00		6	12	280,00
TOTAL						4.980,00

6. RESUMEN DE COSTES (€)

Personal	11.250,00
Recursos informáticos	4.980,00
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Constes indirectos	1.000,00
TOTAL	17.230,00

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de diecisiete mil doscientos treinta euros.

Leganés, a 10 de Septiembre de 2013

El ingeniero proyectista

Fdo.: Alejandro Berrocal Siguero



CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tony Foale. Traducido por David Sánchez. “Motocicletas: comportamiento dinámico y diseño de chasis: el arte y la ciencia”. Ed. Foale, Tony. Año 2003.
- [2] Manuel Arias Paz. “Motocicletas”. Ed. Dossat 2000, 32ª edición, Octubre 2003.
- [3] Reglamento Técnico. Motostudent. Edición 2011/2012.
- [4] Tania Folguera. Proyecto Fin de Carrera: “Estudio de las vibraciones auto excitadas en el tren delantero de un motocicleta”. Universidad Carlos III de Madrid. Año 2011.
- [5] Anibal Isidoro Carmona. “Aerodinámica y actuaciones del avión”. Ed. Thomson Paraninfo, 12ª edición, Año 2004.
- [6] Gaetano Cocco. “Motorcycle design and technology”. Motorbooks, Año 2004.
- [7] Joseph Katz. “Race car aerodynamics”. Bentley Publishers, Año 1995.
- [8] José Meseguer Ruiz. “Aerodinámica básica”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Año 2005.
- [9] Marta Lafuente Godoy, “Simulación numérica de flujos (CFD) con el programa FLUENT” Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos E.P.S. de Ingeniería de Minas, año 2008.

Referencias Web

- [10] <http://www.motostudent.com/> (último acceso 01/06/2013).
- [11] <http://www.bottpower.com/?p=92> (último acceso 02/04/2013).
- [12] <http://www.ansys.com> (último acceso 03/06/2013).
- [13] <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules>
(ultimo acceso 17/06/2013)

